

Marcela Ormenese

Controlador *fuzzy* para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (DEMIC/ FEEC/ UNICAMP)

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (DEMIC/ FEEC/ UNICAMP)

Dra. Maria Nídia Ramos Daoud Yacoub (Consultora)

Campinas, SP

2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Or57c Ormense, Marcela
Controlador fuzzy para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares / Marcela Ormense. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: José Antonio Siqueira Dias.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Lógica difusa. 2. Aquecedores solares de água. 3. Aquecimento solar. 4. Coletores solares. I. Dias, José Antonio Siqueira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Fuzzy controller for optimization of water heating systems with solar collectors

Palavras-chave em Inglês: Fuzzy Logic, Solar water heaters, Solar Heating, Solar collectors

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Elnatan Chagas Ferreira, Maria Nídia Ramos Daoud Yacoub

Data da defesa: 18/05/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Marcela Ormenese

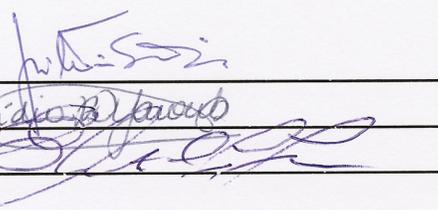
Data da Defesa: 18 de maio de 2009

Título da Tese: "Controlador Fuzzy para Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água com Coletores Solares"

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente): _____

Dra. Maria Nídia Ramos Daoud Yacoub: _____

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira: _____

Handwritten signatures in blue ink are present over the signature lines. The first signature is for Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias, the second for Dra. Maria Nídia Ramos Daoud Yacoub, and the third for Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira.

*“A mente que se abre a uma nova idéia,
jamais voltará ao seu tamanho original.”
Albert Einstein*

*Aos meus pais Antonio e Maria Inês.
Ao meu amor Carlos Eduardo.*

Resumo

Os sistemas de aquecimento solar disponíveis comercialmente, embora proporcionem boa economia de energia elétrica, não apresentam bom desempenho em dias com baixa radiação, pois o *boiler* é automaticamente preenchido com água fria toda vez que ocorre consumo de água quente.

Neste trabalho é proposto e estudado um sistema de aquecimento solar que é otimizado para proporcionar uma mínima utilização da energia elétrica no auxílio ao aquecimento de água. Um controlador *fuzzy* analisa a intensidade da radiação solar, a temperatura da água dentro do *boiler*, a quantidade de água dentro do *boiler* e controla a entrada de água fria no *boiler*, otimizando o sistema.

Foram modelados dois sistemas de aquecimento: um convencional e este sistema com o controlador *fuzzy*; e, através de simulações, suas eficiências foram comparadas. Os resultados obtidos em simulação mostram que o sistema proposto com controlador *fuzzy* apresenta eficiência superior aos sistemas convencionais. Para um período de três dias de inverno, com baixa radiação solar, o sistema convencional consumiu uma energia elétrica de 10,08 kWh enquanto que o sistema proposto consumiu apenas 1,86 kWh.

Palavras-chave: coletores solares, lógica *fuzzy*, aquecimento de água.

Abstract

Although significant savings in electrical energy are achieved with commercially available solar water heaters, they do not present a good performance in days that the radiation is not good, because the boiler is filled with cold water whenever the hot water is used.

In this work, a new solar heating system, which minimizes the use of electrical energy, is proposed. The proposed system uses a fuzzy controller that analyzes the intensity of solar radiation, the temperature of the water inside the boiler and the volume of water inside the boiler, to actuate on a On/Off valve which controls the boiler's input of cold water.

Two solar heating systems were modeled: a conventional system and the new proposed system with the fuzzy controller; and their efficiencies were compared using computer simulations. The obtained results show that the proposed system with the fuzzy controller presents a much higher performance when compared to the traditional system. Simulation results indicate that for a three winter days period, with low intensity solar radiation, the conventional system consumed 10.08 kwh of electrical energy while the proposed system needed only 1.86 kwh to achieve the same performance.

Keywords: Solar heaters, fuzzy logic, water heating.

Agradecimentos

Não há palavras que expressem a minha felicidade em finalizar este trabalho. Foram muitas as dificuldades enfrentadas durante todo o processo de desenvolvimento desta pesquisa mas, felizmente, todas elas superadas;

Agradeço aos meus pais: Antonio e Maria Inês, exemplos de honestidade e dedicação, a quem devo muito do que sou; creio que mesmo todo agradecimento não seria suficiente para recompensá-los. Obrigada pelos ensinamentos, pelo carinho, estímulo e suporte em todas as etapas de minha vida;

Ao meu anjo Carlos Eduardo, pelo amor, pela compreensão, ajuda, paciência e principalmente pelo grande apoio e incentivo durante todos estes anos;

À minha irmã Mariana por todo auxílio, carinho e paciência;

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias, por sua forma tranquila, porém eficiente de guiar-me nesta jornada. Obrigada pela oportunidade, orientação, amizade e sobretudo pela confiança em mim depositada;

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
2 Energia Solar Aplicada ao Aquecimento de Água	2
2.1 Introdução	2
2.2 Radiação Solar	3
2.2.1 Aquecedor Solar	4
2.2.2 Elementos que compõem um sistema de aquecimento solar	5
2.3 Sistema Brasileiro de Aquecimento Solar de Água	7
3 Lógica <i>Fuzzy</i> Aplicada no Controle de Sistemas de Aquecimento Solar de Água	9
3.1 Introdução	9
3.2 Modelagem dos Sistemas	9
3.2.1 Sistema com Controlador <i>Fuzzy</i>	10
3.2.1.1 Reservatório de Água Fria	10
3.2.1.2 Válvula de Água Fria	10
3.2.1.3 <i>Boiler</i>	10
3.2.1.4 Coletor Solar	11
3.2.1.5 Termo-Sifão	13
3.2.1.6 Válvula de Água Quente	13
3.2.1.7 Auxiliar Elétrico	13
3.2.1.8 Controlador <i>Fuzzy</i>	13
3.2.2 Sistema Convencional	17
3.2.2.1 Reservatório de Água Fria	17
3.2.2.2 Válvula de Água Fria	18
3.2.2.3 <i>Boiler</i>	18
4 Análise dos Resultados	19
4.1 Introdução	19
4.2 Situações Analisadas	19
4.2.1 Caso # 1	20

4.2.1.1	Descrição	20
4.2.1.2	Análise do Sistema Convencional	21
4.2.1.3	Análise do Sistema com Controle <i>Fuzzy</i>	23
4.2.1.4	Comparação entre os Sistemas	26
4.2.2	Caso # 2	27
4.2.2.1	Descrição	27
4.2.2.2	Análise do Sistema Convencional	28
4.2.2.3	Análise do Sistema com Controle <i>Fuzzy</i>	29
4.2.2.4	Comparação entre os Sistemas	30
4.2.3	Caso # 3	31
4.2.3.1	Descrição	31
4.2.3.2	Análise do Sistema Convencional	32
4.2.3.3	Análise do Sistema com Controle <i>Fuzzy</i>	33
4.2.3.4	Comparação entre os Sistemas	34
4.2.4	Caso # 4	35
4.2.4.1	Introdução	35
4.2.4.2	Análise do Sistema Convencional	36
4.2.4.3	Análise do Sistema com Controle <i>Fuzzy</i>	37
4.2.4.4	Comparação entre os Sistemas	38
4.2.5	Caso # 5	39
4.2.5.1	Introdução	39
4.2.5.2	Análise do Sistema Convencional	40
4.2.5.3	Análise do Sistema com Controle <i>Fuzzy</i>	40
4.2.5.4	Comparação entre os Sistemas	41
4.2.6	Caso # 6	42
4.2.6.1	Introdução	42
4.2.6.2	Análise do Sistema Convencional	43
4.2.6.3	Análise do Sistema com Controle <i>Fuzzy</i>	44
4.2.6.4	Comparação entre os Sistemas	45
4.3	Comparação entre os Casos	46
5	Conclusões e trabalhos futuros	47
A	Fundamentos da Teoria <i>Fuzzy</i>	49
A.1	Introdução	49
A.2	Conjuntos <i>Fuzzy</i>	49
A.2.1	Função de Pertinência	50
A.2.2	Conceitos Básicos de Conjuntos <i>Fuzzy</i>	51
A.2.3	Operações com Conjuntos <i>Fuzzy</i>	52
A.2.4	Normas e Co-normas Triangulares	54
A.2.5	Relações <i>Fuzzy</i>	55
A.2.5.1	Operações com Relações <i>Fuzzy</i>	56
A.2.5.2	Composição <i>Fuzzy</i>	56
A.3	Lógica <i>Fuzzy</i>	56

A.3.1	Variável Linguística	56
A.3.1.1	Restrições Linguísticas	57
A.3.2	Regras <i>Fuzzy</i>	57
A.3.3	Raciocínio Aproximado	58
A.4	Controlares <i>Fuzzy</i>	58
A.5	Modelos de Sistemas <i>Fuzzy</i>	60
A.5.1	Modelo Mamdani	60
A.5.2	Modelo Sugeno	61
	Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

2.1	Radiação solar global.	3
2.2	Média anual da radiação solar no Brasil.	3
2.3	Radiação solar no coletor plano.	4
2.4	Esquema do <i>boiler</i> mostrando um corte em sua estrutura.	5
2.5	Diagrama de uma placa coletora.	6
2.6	Diagrama da circulação natural.	7
2.7	Diagrama da circulação forçada.	8
3.1	Diagrama de blocos do sistema de aquecimento de água proposto.	10
3.2	Comportamento da radiação solar durante um dia.	11
3.3	Temperatura da água coletada entre 10:30 e 16:00 hs, entre os meses de dezembro de 2005 e abril de 2006.	12
3.4	Variáveis de entrada e saída definidas no sistema <i>fuzzy</i>	14
3.5	Variável linguística radiação.	14
3.6	Variável linguística temperatura.	15
3.7	Variável linguística quantidade.	15
3.8	Diagrama de blocos de um sistema convencional.	17
4.1	23 de junho de 2008.	20
4.2	24 de junho de 2008.	20
4.3	25 de junho de 2008.	20
4.4	Quantidade de água no <i>boiler</i>	21
4.5	Temperatura da água no <i>boiler</i>	22
4.6	Auxiliar elétrico.	22
4.7	Quantidade de água no <i>boiler</i>	24
4.8	Temperatura da água no <i>boiler</i>	24
4.9	Auxiliar elétrico.	25
4.10	Comparação entre os sistemas com todas as combinações de banho.	27
4.11	06 de junho de 2008.	28
4.12	07 de junho de 2008.	28
4.13	08 de junho de 2008.	28
4.14	Comparação entre os sistemas com todas as combinações de banho.	31
4.15	16 de junho de 2008.	32
4.16	17 de junho de 2008.	32
4.17	18 de junho de 2008.	32

4.18	Comparação entre os sistemas com todas as combinações de banho.	35
4.19	01 de janeiro de 2008.	36
4.20	02 de janeiro de 2008.	36
4.21	03 de janeiro de 2008.	36
4.22	08 de janeiro de 2008.	39
4.23	09 de janeiro de 2008.	39
4.24	10 de janeiro de 2008.	39
4.25	17 de janeiro de 2008.	42
4.26	18 de janeiro de 2008.	43
4.27	19 de janeiro de 2008.	43
A.1	Triangular	50
A.2	Trapezoidal	51
A.3	Gaussiana	51
A.4	Interseção dos conjuntos A e B	53
A.5	União dos conjuntos A e B	53
A.6	Complemento do conjunto A	53
A.7	Estrutura de um controlador <i>fuzzy</i>	59
A.8	Sistema Mamdani.	61
A.9	Sistema Sugeno.	62

Lista de Tabelas

3.1	Quantidade mínima de água no <i>boiler</i>	15
3.2	Quantidade baixa de água no <i>boiler</i>	16
3.3	Quantidade média de água no <i>boiler</i>	16
3.4	Quantidade alta de água no <i>boiler</i>	16
3.5	Quantidade máxima de água no <i>boiler</i>	16
4.1	Sistema convencional.	23
4.2	Sistema com controle <i>fuzzy</i>	25
4.3	Comparação entre os sistemas modelados.	26
4.4	Sistema convencional.	29
4.5	Sistema com controle <i>fuzzy</i>	30
4.6	Comparação entre os sistemas modelados.	30
4.7	Sistema convencional.	33
4.8	Sistema com controle <i>fuzzy</i>	34
4.9	Comparação entre os sistemas modelados.	34
4.10	Sistema convencional.	37
4.11	Sistema com controle <i>fuzzy</i>	38
4.12	Comparação entre os sistemas modelados.	38
4.13	Sistema convencional.	40
4.14	Sistema com controle <i>fuzzy</i>	41
4.15	Comparação entre os sistemas modelados.	42
4.16	Sistema convencional.	44
4.17	Sistema com controle <i>fuzzy</i>	45
4.18	Comparação entre os sistemas modelados.	45
4.19	Comparação entre os casos apresentados.	46

Capítulo 1

Introdução

O limite da disponibilidade de energias fósseis e as ameaças ao meio ambiente levaram o homem a buscar fontes alternativas de energia que produzam pouco impacto ambiental, e a energia solar está entre elas. Esta fonte de energia limpa, entre outras aplicações, pode ser utilizada no aquecimento de água, proporcionando uma economia no uso da energia elétrica.

No entanto, apesar desta economia proporcionada, nota-se que os sistemas atuais de aquecimento de água por coletores solares não estão otimizados, uma vez que nestes sistemas de aquecimento o *boiler* é mantido constantemente cheio, ou seja, sempre que há saída de água quente ele é automaticamente completado, provocando uma queda na temperatura de sua água e exigindo, muitas vezes, que o auxiliar elétrico seja acionado para completar o aquecimento e garantir ao usuário água em temperatura confortável para o uso.

O objetivo deste trabalho é projetar um sistema visando minimizar o uso do auxiliar elétrico e consequentemente o gasto com energia elétrica. Para isso, uma válvula de água fria do tipo Liga/Desliga será utilizada para liberar a entrada de água apenas quando necessário ou termicamente viável.

Esta válvula será comandada por um controlador *fuzzy*, visto que trata-se de um sistema que possui informações imprecisas e tal controlador utiliza-se de regras lógicas para controlar um determinado processo. Além disso, são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar.

Para uma análise comparativa da eficiência, dois sistemas serão modelados: o sistema aqui proposto, que controlará a entrada de água fria no *boiler* e um sistema de aquecimento convencional.

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo descrito em mais quatro capítulos, além deste introdutório.

No Capítulo 2 é apresentada uma descrição do sistema de aquecimento solar brasileiro, discutindo suas vantagens e desvantagens. Além disso, destaca-se a importância do uso das energias renováveis.

O Capítulo 3 mostra em detalhes a modelagem do sistema proposto com controlador *fuzzy* e do sistema convencional utilizado para comparação. Todos os componentes do sistema são mostrados bloco a bloco, apresentando suas características e principais funções.

No Capítulo 4 são descritos alguns casos analisados, sendo seus resultados apresentados e discutidos.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e feitas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Energia Solar Aplicada ao Aquecimento de Água

2.1 Introdução

O Sol é a origem de praticamente todas as formas de energia que o homem vem utilizando ao longo de sua história. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária para o seu desenvolvimento da radiação solar.

Tal radiação induz a circulação atmosférica em larga escala causando os ventos (Energia Eólica) [1] e também provoca a evaporação, origem do ciclo das águas, possibilitando o represamento e a geração de eletricidade (Energia Hidráulica), sendo esta a forma de energia mais utilizada no Brasil [2]. Embora seja uma energia renovável, as usinas hidroelétricas produzem um grande impacto ambiental, devido ao alagamento de florestas e áreas cultiváveis, além disso, após submersas tais florestas degradam-se e emitem gases poluentes.

Na maior parte do mundo, a energia procede dos combustíveis fósseis. Como estes combustíveis são limitados e sua demanda aumenta constantemente, a manutenção dos padrões energéticos atuais será impossível no futuro. Além disso, estudos sobre as variações de temperatura na Terra feitos pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), mostram que, nas últimas três décadas o aquecimento global se acelerou e o homem é o grande responsável, uma vez que ao queimar combustíveis fósseis, lança no ar o dióxido de carbono, que ao ser liberado na atmosfera, cria o chamado efeito estufa, impedindo o calor de escapar para o espaço.

Assim, com o limite da disponibilidade de energias fósseis e as ameaças ao meio ambiente, intensificaram-se as pesquisas sobre energias renováveis, levando o homem a buscar fontes alternativas, menos poluente, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental. Com isso o uso das fontes tradicionais de energia traça sua trajetória ao declínio, não só pela sua característica efêmera, mas também por ser uma ameaça ao meio ambiente.

2.2 Radiação Solar

A energia solar é uma das fontes de energia mais limpas que existe, é abundante, permanente, renovável, não polui, não prejudica o ecossistema e não influi no efeito estufa.

O Brasil está entre os países com os maiores índices de radiação, como pode ser observado na Figura 2.1 [3] e possui uma média anual que varia entre 12 e 22 MJ/m² como mostra a Figura 2.2.

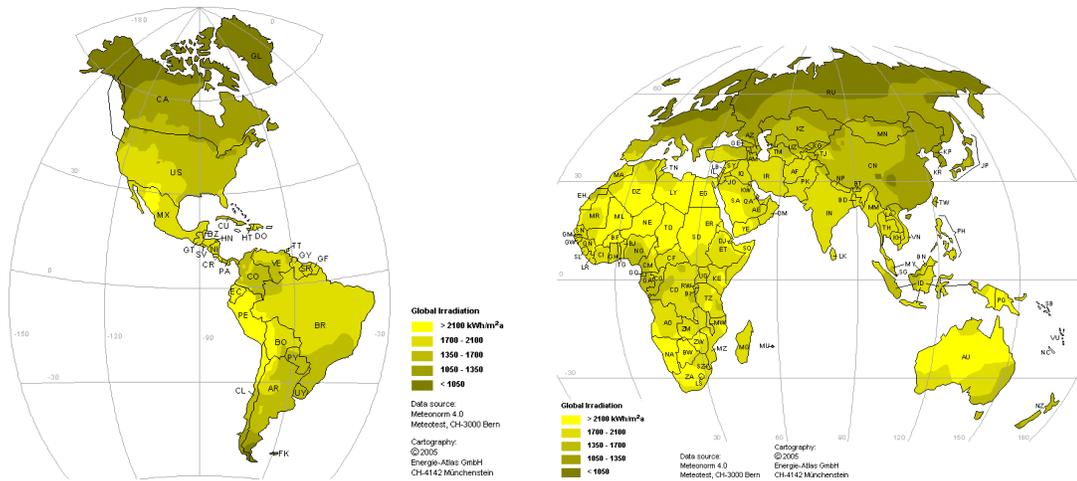


Fig. 2.1: Radiação solar global.

Tais valores são comparáveis aos de regiões desérticas como Dongola, localizada no Deserto Árábico, no Sudão e Dagget no Deserto de Mojave, na Califórnia, com uma média anual de radiação de 23,8 MJ/m² e 20,9 MJ/m² respectivamente [4].

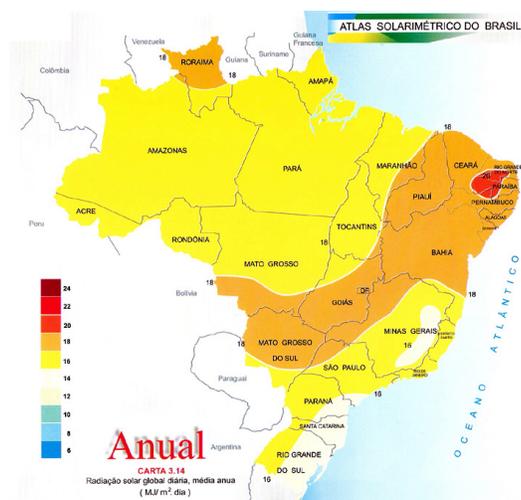


Fig. 2.2: Média anual da radiação solar no Brasil.

Embora disponha de todo esse potencial energético, nosso país ainda faz uso irracional de energia para o aquecimento de água. Segundo o PROCEL (*Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*) existem entre 25 e 27 milhões de chuveiros elétricos instalados, sendo este um dos aparelhos que mais consomem energia em uma residência, representando de 25 a 30% do valor da conta de luz [5]. Além disso, consomem cerca de 5% de toda a eletricidade produzida e são responsáveis por aproximadamente 18% do pico de demanda do sistema elétrico nacional entre 18 e 21 horas [6]. Tal problema, poderia ser amenizado com a utilização da tecnologia termosolar, que consiste no uso da energia solar para o aquecimento da água através de coletores solares [7].

2.2.1 Aquecedor Solar

O sistema de aquecimento solar tem como função converter a energia solar em térmica utilizando os coletores solares. Tais equipamentos são responsáveis pela captação e armazenamento da energia fototérmica e possuem a grande vantagem de aproveitar todos os tipos de radiação (direta, difusa e refletida) [8], como mostra a Figura 2.3.

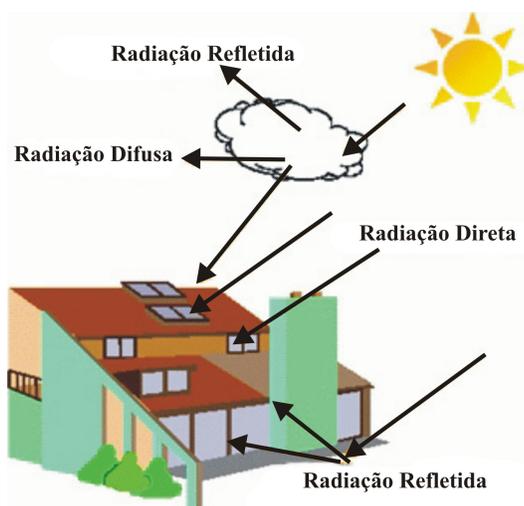


Fig. 2.3: Radiação solar no coletor plano.

Além disso, possuem diversos atrativos como: vida útil longa (em condições normais de uso, podem durar de 15 a 20 anos), baixa manutenção, rápido retorno do investimento e vantagens ecológicas.

O sistema de aquecimento solar proporciona benefícios para o aquecimento de água tanto em pequenas residências quanto em grandes prédios como hospitais, hotéis, etc. Sua eficiência e a temperatura da água no ponto de consumo variam de acordo com a região, com a tecnologia empregada, época do ano, condições climatológicas e instalação. O correto dimensionamento é muito importante: no hemisfério sul o coletor deverá ser orientado em direção ao norte geográfico para que se obtenha um maior tempo de incidência de radiação solar. Deve-se lembrar que o desempenho pode ser reduzido caso uma pequena área do coletor esteja na sombra. A falta de limpeza das coberturas dos coletores também contribui para a diminuição de sua eficiência.

Em uma instalação residencial no estado de São Paulo, em um dia ensolarado a água atinge, durante o período em que está sob exposição do sol, uma temperatura de aproximadamente 50°C no inverno e 70°C no verão. No entanto, com o fim da radiação e o passar das horas é impossível conter totalmente as perdas térmicas no *boiler* ocorrendo uma queda de temperatura. Isto, entretanto, na maioria das vezes não prejudica o funcionamento do sistema, já que a temperatura inicial é bastante elevada, compensando os efeitos das possíveis perdas.

Porém, é importante ressaltar que o sistema de aquecimento solar é projetado para minimizar o uso da energia elétrica, não eliminando totalmente o uso das fontes tradicionais. Quando a radiação não for suficiente para aquecer a água a uma temperatura adequada, tradicionalmente um sistema auxiliar elétrico entra em ação, completando o aquecimento, uma vez que a água já estará pré-aquecida. Esse sistema normalmente fica desligado, sendo acionado somente quando necessário.

2.2.2 Elementos que compõem um sistema de aquecimento solar

- **Caixa d'Água Fria**

Utilizada para alimentar o *boiler*, que é mantido sempre cheio em um sistema convencional [9].

- **Boiler (Reservatório Térmico)**

O *boiler* mostrado na Figura 2.4 [10], também conhecido como reservatório térmico, é utilizado para o armazenamento da água aquecida pelos coletores. Internamente, a água quente se mistura com a água fria ficando na parte superior, a água com temperatura um pouco mais elevada.

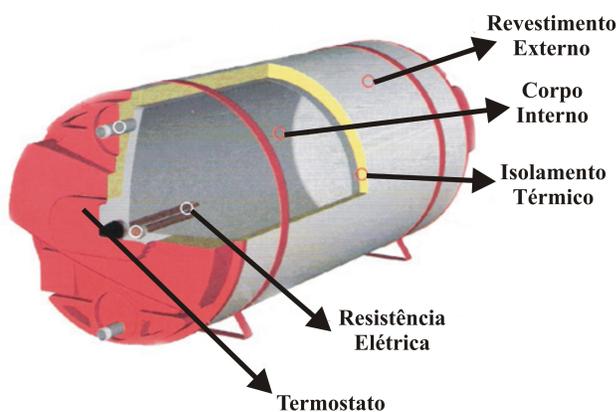


Fig. 2.4: Esquema do *boiler* mostrando um corte em sua estrutura.

Geralmente, possuem um sistema de aquecimento auxiliar, constituído por um termostato, para a verificação da temperatura da água e um relé para acionamento de uma resistência elétrica. Este sistema auxiliar é utilizado geralmente em dias chuvosos, com pouca incidência de radiação ou quando há uma grande injeção de água fria no *boiler*.

O corpo interno do reservatório é constituído de aço inox ou cobre, enquanto no revestimento externo é utilizado o alumínio, responsável pela proteção contra as intempéries. Ele é isolado termicamente com poliuretano para diminuir as perdas de calor para o meio ambiente.

O *boiler* pode trabalhar em diferentes pressões. Quando a caixa de água fria encontra-se logo acima do *boiler*, utilizamos um modelo de baixa pressão, sendo que o seu nível de água deverá estar no máximo com 2 m.c.a.¹ para os modelos em cobre e 5 m.c.a para os modelos em inox. É importante ressaltar que os modelos de baixa pressão não podem ser pressurizados ou alimentados com água da rede pública. Já os modelos de alta pressão possuem resistência para até 40 m.c.a. e são recomendados para sistemas pressurizados e instalações onde a caixa de água fria encontra-se muito acima do *boiler* [11].

• Placas Coletoras

As placas coletoras são responsáveis pela absorção da radiação solar. O calor gerado nas placas é transferido para a água que circula no interior de suas tubulações. A Figura 2.5 [12] apresenta uma vista em corte de uma placa coletora típica, mostrando os seus elementos internos e externos.

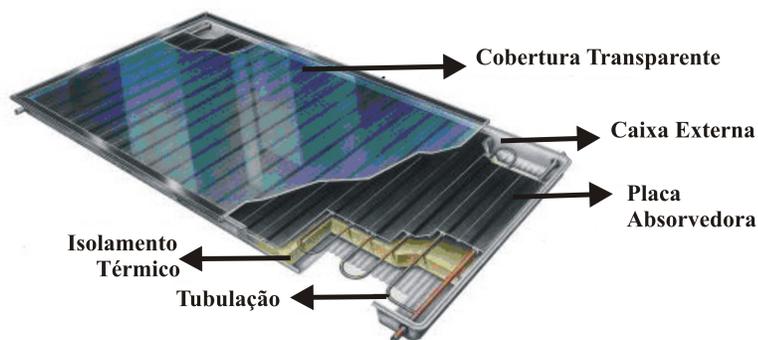


Fig. 2.5: Diagrama de uma placa coletora.

Da Figura 2.5 vê-se que a placa coletora é formada por cinco componentes básicos:

- Cobertura Transparente: essa superfície transparente pode ser de vidro ou algum tipo de polímero, sendo que a espessura do vidro mais utilizada é de 3mm. A cobertura transparente tem como função produzir o efeito estufa dentro do coletor, reduzindo as perdas de calor por radiação e por convecção, além de impedir que entrem no coletor a água de chuva, materiais sólidos, poeira, etc [13];
- Tubos Condutores de Fluido: geralmente é utilizado o cobre, devido à sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão.
- Placa Absorvedora: também chamada de aleta, tem a missão de absorver de forma eficiente a radiação solar e transformá-la em energia térmica, transferindo energia para os

¹1 metro de coluna d'água = 1 mca = aproximadamente 0,1kgf/cm².

tubos por onde circula o fluido. As aletas devem estar ajustadas à tubulação para que a condução ou transferência de calor para os tubos seja a mais eficiente possível. Geralmente são feitas de cobre, alumínio ou polipropileno negro, uma vez que as cores escuras absorvem mais energia. Quando a energia incide sobre uma superfície fosca preta, uma grande porcentagem dessa energia é absorvida, por isso a placa absorvedora deverá ser pintada em uma de suas faces em uma cor próxima do negro, para maximizar a absorção da energia solar [14];

- Isolante Térmico: é muito importante para minimizar as perdas de calor para o exterior. Um material isolante é colocado entre a caixa externa e a placa absorvedora com os tubos, geralmente utiliza-se lã de vidro, lã de rocha ou espuma de poliuretano;
- Caixa Externa: é fabricada em aço inox, alumínio, material termoplástico ou galvalume e tem a função de proteger o sistema coletor.

2.3 Sistema Brasileiro de Aquecimento Solar de Água

O funcionamento do sistema é baseado na circulação da água entre o *boiler* e os coletores solares até que a temperatura seja homogênea em todo o sistema. O fluido pode se movimentar naturalmente (termo-sifão) ou com o auxílio de uma bomba (circulação forçada).

Nos sistemas de circulação natural (termo-sifão), a água dos coletores fica mais quente, portanto menos densa que a água do *boiler*, com isso, a água fria “empurra” a água quente provocando a circulação. No entanto, a circulação da água dentro do sistema pode ser bastante lenta, especialmente quando há uma pequena diferença de temperatura entre a água do coletor e do *boiler*, reduzindo assim a quantidade de energia útil que pode ser coletada. Normalmente o sistema termo-sifão cobre entre 60% e 70% da necessidade de energia [15].

Neste sistema é necessário que as placas estejam mais baixas que a base do *boiler*, como pode ser observado na Figura 2.6 [10]. O ângulo de inclinação do coletor será igual ao da latitude acrescido de aproximadamente 10° . O aumento dado ao ângulo da latitude permite um melhor aproveitamento da radiação em virtude da variação anual da inclinação solar [13], quando a inclinação for menor que 20° , é recomendada a instalação de um suporte, para garantir o fluxo adequado de água.

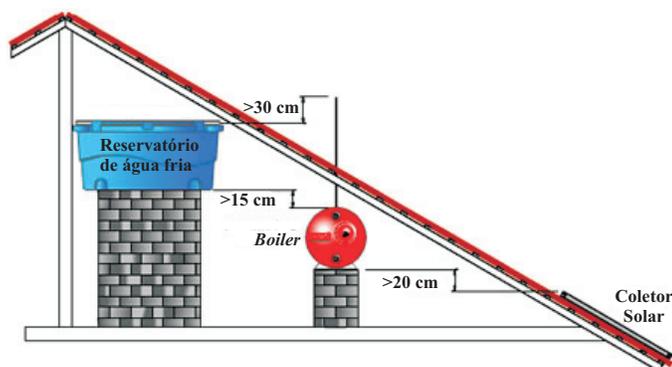


Fig. 2.6: Diagrama da circulação natural.

A circulação da água também pode ser feita através de motobombas em um processo chamado de circulação forçada ou bombeado. Neste caso a circulação da água não ocorre sozinha, mas sim com o auxílio de uma bomba. O *boiler* sempre ficará abaixo dos coletores e o ângulo de inclinação do coletor poderá ser igual ao da latitude do lugar [13]. A Figura 2.7 [10] apresenta um esquema deste sistema, que oferece maior eficiência em relação ao sistema termo-sifão, especialmente quando há nuvens e os níveis de energia solar ficam baixos. Um sistema forçado cobre mais de 80% da necessidade de energia [15].

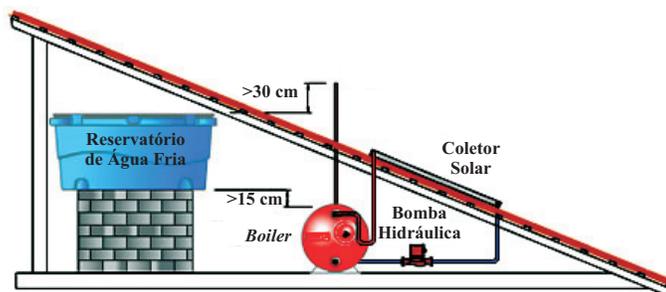


Fig. 2.7: Diagrama da circulação forçada.

Capítulo 3

Lógica *Fuzzy* Aplicada no Controle de Sistemas de Aquecimento Solar de Água

3.1 Introdução

Nos sistemas convencionais de aquecimento solar de água, o reservatório de água fria tem como função abastecer automaticamente e manter sempre cheio o *boiler*, ou seja, sempre que a água quente é utilizada ele é automaticamente completado com água fria. Tal procedimento provoca uma queda na temperatura de sua água exigindo muitas vezes que o auxiliar elétrico seja acionado para completar o aquecimento e garantir ao usuário água em temperatura confortável para o uso. A proposta deste trabalho é implementar um controle para a entrada de água fria no *boiler*, de maneira que o gasto com energia elétrica devido ao acionamento do sistema auxiliar possa ser reduzido em função de um melhor aproveitamento térmico do *boiler*.

Para tal controle, a intensidade de radiação solar, a quantidade e a temperatura da água no interior do *boiler* foram os parâmetros analisados pelo controlador, cuja atuação incidiu sobre uma válvula do tipo Liga/Desliga que permite ou não a entrada de água no *boiler*. Como ferramenta de projeto foi utilizado o *software* MatLab [16].

3.2 Modelagem dos Sistemas

Para que uma análise da eficiência do sistema com controlador *fuzzy* pudesse ser feita, dois sistemas foram modelados: o primeiro ilustrado na Figura 3.1 é o sistema proposto neste trabalho, que controla a entrada de água fria no *boiler*. O segundo, mostrado na Figura 3.8, modela um sistema de aquecimento convencional, no qual, o *boiler* é preenchido com água fria sempre que houver saída de água quente.

Diferente da maioria dos sistemas convencionais que utilizam uma resistência elétrica dentro do *boiler* aquecendo toda a água do mesmo quando necessário. Ambos os sistemas modelados utilizam um chuveiro para aquecer a água, uma vez que a proposta deste trabalho é reduzir ao máximo o consumo de energia elétrica durante o banho.

Para modelar os elementos dos sistemas e determinar o tamanho do *boiler* e do reservatório de água fria, foi usada como base uma residência habitada por uma família de quatro pessoas.

3.2.1 Sistema com Controlador *Fuzzy*

A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos do sistema proposto, que consiste de um reservatório de água fria, um controlador *fuzzy*, uma válvula de entrada e uma de saída e o sistema de aquecimento solar.

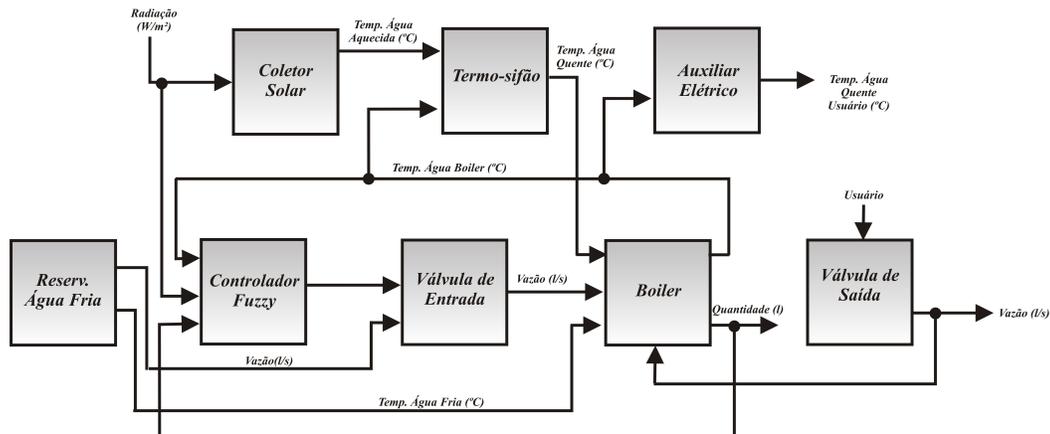


Fig. 3.1: Diagrama de blocos do sistema de aquecimento de água proposto.

A seguir cada bloco do sistema modelado será descrito detalhadamente.

3.2.1.1 Reservatório de Água Fria

O reservatório de água fria tem a função de suprir o *boiler* quando necessário completando-o com água em temperatura ambiente. Tal temperatura foi representada por um seno com amplitude referente à metade da variação de sua temperatura durante um dia, mais uma componente média referente à sua média diária para simular as variações ocorridas durante um dia. Além disso, sua fase inicial foi modificada de maneira que a água atinja sua temperatura máxima por volta das 15:00 hs.

Com relação ao reservatório utilizou-se um de 500 litros, cuja vazão de saída considerada foi de 0,3 l/s, valor padrão para esse reservatório com diâmetro do cano de saída de 28 *mm*, uma vez que no sistema proposto a entrada de água fria no *boiler* é controlada por uma válvula do tipo Liga/Desliga.

3.2.1.2 Válvula de Água Fria

A válvula de entrada de água fria Liga/Desliga, foi comandada diretamente pelo controlador *fuzzy*, que será apresentado em 3.2.1.8.

3.2.1.3 Boiler

Utilizado para armazenar a água aquecida, este modelo tem como base um *boiler* de 500 litros. Normalmente, a água quente se mistura com a água fria, gerando um gradiente de temperatura dentro do *boiler*, no qual a água com temperatura um pouco mais elevada fica na parte superior. No entanto,

por esse trabalho ser uma primeira aproximação e devido a complexidade do modelamento do reservatório térmico, no sistema modelado foi considerado que toda a água do *boiler* está com a mesma temperatura, ou seja, não há gradiente térmico. Além disso, o equilíbrio térmico acontece imediatamente com a entrada de água fria, ou seja, a cada passo de simulação todo o *boiler* se encontra com uma nova temperatura. Outra consideração é que com o passar do tempo verifica-se certa redução na temperatura, devido às perdas térmicas do *boiler*, que não possui um isolamento térmico perfeito, porém este fato também não foi considerado no modelo.

No sistema modelado, o *boiler* é inicializado sempre com 500 litros. Assim, quando há apenas saída de água, a quantidade de água no *boiler* é atualizada a cada passo de simulação e a temperatura por sua vez não é alterada já que neste caso não houve a entrada de água fria.

Com a entrada de água fria no *boiler*, a quantidade de água e a temperatura da mesma são atualizadas imediatamente a cada passo de simulação, sendo a nova temperatura encontrada através da Equação do equilíbrio térmico 3.1 [17] :

$$T_t = \frac{Q_f \cdot T_f + Q_q \cdot T_q}{Q_f + Q_q} \quad (3.1)$$

na qual: Q_f é a quantidade de água vinda do reservatório de água fria; T_f é a temperatura da água fria; Q_q é a quantidade de água quente no *boiler*, e T_q é a temperatura da água no *boiler*.

3.2.1.4 Coletor Solar

As placas coletoras são responsáveis pela absorção da radiação solar, o calor gerado nas placas é transferido para a água que circula no interior de suas tubulações, assim o primeiro passo foi verificar o comportamento da radiação solar durante um dia. De acordo com a Figura 3.2 [18] a radiação no verão pode atingir valores máximos por volta de 1100 W/m^2 , começando às seis da manhã, atingindo seu pico ao meio-dia e terminando às seis da tarde. A amplitude da radiação pode variar de acordo com o dia e a época do ano.

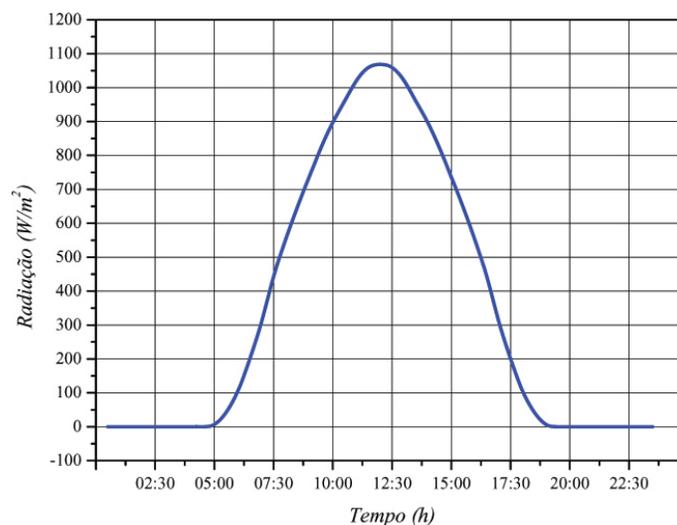


Fig. 3.2: Comportamento da radiação solar durante um dia.

Por comparação, nota-se que a radiação pode ser aproximada por um pulso senoidal, tendo sua frequência e fase adotadas de maneira que apresente características próximas a da radiação observada durante um dia.

A função de transferência do coletor foi obtida com base nos dados das Figuras 3.3 [19] e 3.2. Utilizando a temperatura medida entre 10:00 e 15:00 hs, foi construído um gráfico de temperatura X tempo, sendo que uma função de primeira-ordem, mostrada na Equação 3.2 foi a que melhor se ajustou a essa curva.

$$y(t) = 66,70 - 38,45 \cdot e^{\frac{-t}{2,146}} \quad (3.2)$$

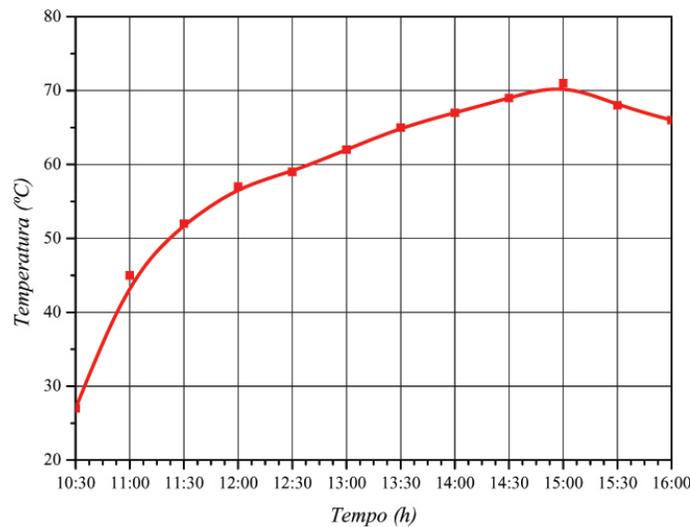


Fig. 3.3: Temperatura da água coletada entre 10:30 e 16:00 hs, entre os meses de dezembro de 2005 e abril de 2006.

O próximo passo foi utilizar os valores encontrados pela função, dada na Equação 3.2, além de considerar uma radiação constante de 900 W/m^2 no período entre 10:00 e 15:00 hs e uma temperatura ambiente de 27°C , para obter a função de transferência do coletor utilizando para isso a metodologia clássica de controle [20] e [21], sendo essa função dada na Equação 3.3.

$$FT = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0,0434}{2,146s + 1} \quad (3.3)$$

Como foi possível observar na Figura 3.2 a radiação solar começa a diminuir após o meio-dia, de maneira que a saída da função de transferência também diminui, não se comportando como em um sistema real, no qual a água continua sendo aquecida até às 15:00 hs como mostra a Figura 3.3.

Para solucionar essa disparidade, uma adaptação foi criada, na qual há um ajuste representando um aumento de aproximadamente 1/3 da amplitude da radiação com pico máximo às 15:00 hs.

Devido a esta adaptação, a função de transferência foi modificada para que a temperatura máxima da água no coletor não ultrapasse os 70°C , tomando como referência a Figura 3.3. Caso contrário, às 15:00 hs a mesma atinge aproximadamente 85°C , assim a função de transferência final passa a ser dada pela Equação 3.4.

$$FT = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0,0323}{2,146s + 1} \quad (3.4)$$

3.2.1.5 Termo-Sifão

No fenômeno termo-sifão, a circulação de água entre os coletores e o *boiler* é provocada pela variação da densidade da água em função de sua temperatura. Para simular este comportamento, no sistema modelado criou-se um programa que compara a temperatura da água na saída do coletor com a temperatura da água no *boiler*, fazendo com que prevaleça a temperatura maior, imitando o fenômeno natural do termo-sifão.

3.2.1.6 Válvula de Água Quente

No sistema modelado, a saída de água quente é controlada pelo usuário. A vazão de água utilizada foi a de um chuveiro convencional, sendo adotado o valor de 0,083 l/s.

3.2.1.7 Auxiliar Elétrico

O auxiliar elétrico garante ao usuário água na temperatura mínima desejada. No sistema modelado, um programa verifica no início de um banho se a temperatura desejada é maior do que a temperatura da água no *boiler*, e se isto for verdade, o auxiliar elétrico é acionado; caso contrário ele é mantido desligado.

3.2.1.8 Controlador *Fuzzy*

Como a proposta é controlar a entrada de água fria no *boiler* em função da viabilidade térmica, foi necessário um conhecimento prévio do processo a ser modelado, para escolher as variáveis de entrada e saída que representam as informações necessárias para a realização do controlador. Com base neste estudo, as variáveis de entrada utilizadas foram: intensidade de radiação solar, temperatura da água no interior do *boiler* e quantidade de água no *boiler*; já a variável de saída utilizada foi posição da válvula de entrada de água fria totalmente aberta ou totalmente fechada. A representação dessas variáveis em um sistema *fuzzy* pode ser vista na Figura 3.4.

As funções de pertinência das variáveis de entrada e as partições dos universos de discurso em termos linguísticos foram determinadas utilizando o processo intuitivo. Assim, temos que a variável radiação solar, tem seu universo de discurso compreendido entre 0 e 1200 W/m^2 e possui cinco termos linguísticos: ótima, boa, média, ruim e péssima, sendo ilustrados na Figura 3.5.

Na variável temperatura adotou-se um intervalo de 0 à 90°C, considerando a variação de temperatura que a água pode apresentar no interior do *boiler*, para esta variável utilizou-se três termos linguísticos: alta, média e baixa. A Figura 3.6 ilustra a variável temperatura.

Para a variável quantidade adotou-se um intervalo de 0 à 500 litros, considerando a variação que a quantidade de água pode ter dentro do *boiler*. Essa variável possui cinco termos linguísticos: mínima, baixa, média, alta e máxima. A Figura 3.7 ilustra a variável quantidade.

Na variável de saída “posição da válvula”, consequentes constantes foram utilizados, sendo zero para válvula fechada e um para válvula aberta.

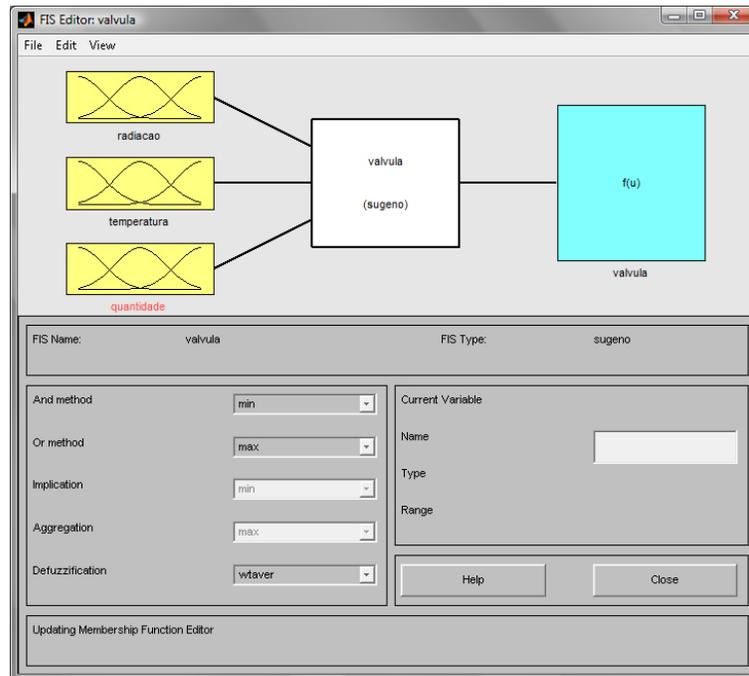


Fig. 3.4: Variáveis de entrada e saída definidas no sistema *fuzzy*.

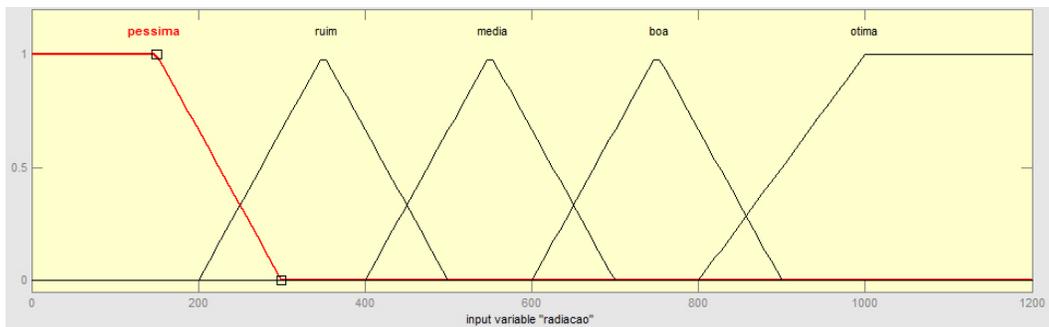


Fig. 3.5: Variável linguística radiação.

Devido ao fato dos parâmetros de entrada serem definidos subjetivamente, utilizou-se funções de pertinência triangulares, como pode ser observado nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

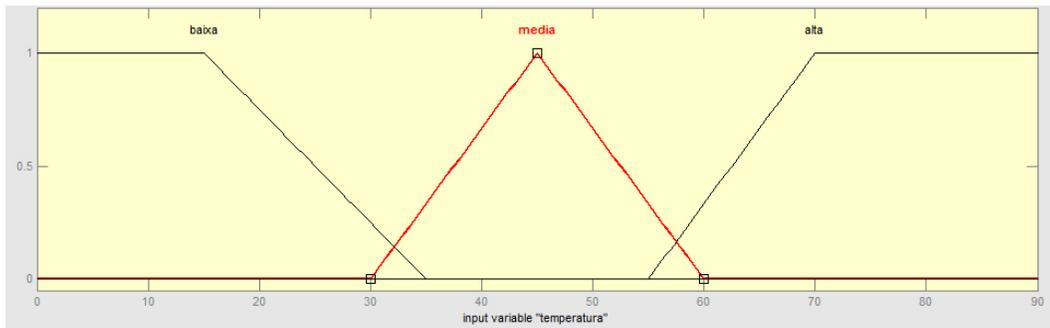


Fig. 3.6: Variável linguística temperatura.

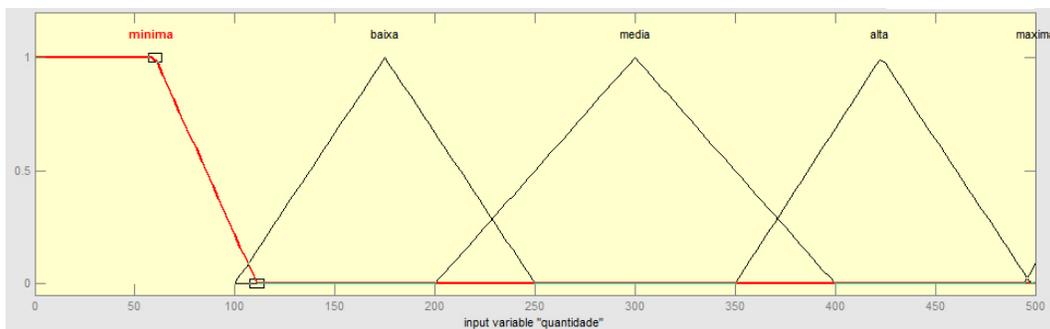


Fig. 3.7: Variável linguística quantidade.

O próximo passo na etapa de construção do controlador *fuzzy* consiste na representação do conhecimento em termos para uma base de regras utilizada pelo sistema de inferência. Neste momento, são utilizados todos os resultados obtidos por meio da observação da operação do sistema e todas as situações possíveis para a atuação do controlador. Dada a combinação das variáveis de entrada, são produzidas as Tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5

<i>Temp.</i> \ <i>Rad.</i>	Péssima	Ruim	Média	Boa	Ótima
Baixa	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir
Média	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir
Alta	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir

Tab. 3.1: Quantidade mínima de água no *boiler*.

<i>Temp.</i> \ <i>Rad.</i>	Péssima	Ruim	Média	Boa	Ótima
Baixa	Fechar	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir
Média	Fechar	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir
Alta	Fechar	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir

Tab. 3.2: Quantidade baixa de água no *boiler*.

<i>Temp.</i> \ <i>Rad.</i>	Péssima	Ruim	Média	Boa	Ótima
Baixa	Fechar	Fechar	Fechar	Abrir	Abrir
Média	Fechar	Fechar	Fechar	Abrir	Abrir
Alta	Fechar	Fechar	Fechar	Abrir	Abrir

Tab. 3.3: Quantidade média de água no *boiler*.

<i>Temp.</i> \ <i>Rad.</i>	Péssima	Ruim	Média	Boa	Ótima
Baixa	Fechar	Fechar	Fechar	Abrir	Abrir
Média	Fechar	Fechar	Fechar	Abrir	Abrir
Alta	Fechar	Fechar	Fechar	Abrir	Abrir

Tab. 3.4: Quantidade alta de água no *boiler*.

<i>Temp.</i> \ <i>Rad.</i>	Péssima	Ruim	Média	Boa	Ótima
Baixa	Fechar	Fechar	Fechar	Fechar	Fechar
Média	Fechar	Fechar	Fechar	Fechar	Fechar
Alta	Fechar	Fechar	Fechar	Fechar	Fechar

Tab. 3.5: Quantidade máxima de água no *boiler*.

Um total de 75 regras foram criadas, visto que as variáveis radiação solar e quantidade de água possuem cinco termos linguísticos cada e a variável temperatura possui três termos linguísticos. A partir do conjunto de dados de entrada e da base de regras estabelecida, o mecanismo de inferência efetua um teste sobre os antecedentes das regras e, uma vez verificadas as condições de entrada, um conseqüente é produzido na saída. O método de inferência escolhido foi o de Sugeno [22] de ordem-zero.

3.2.2 Sistema Convencional

Após a implementação do sistema com controlador *fuzzy*, um sistema convencional foi modelado, utilizando as mesmas restrições, para ser comparado com o sistema proposto, podendo nos mostrar uma medida da eficiência do sistema com controlador *fuzzy*. Assim, temos que o coletor solar 3.2.1.4, o termo-sifão 3.2.1.5 e o auxiliar elétrico 3.2.1.7 são idênticos nos dois sistemas, enquanto que os outros blocos sofreram algumas modificações.

A Figura 3.8 mostra o diagrama de blocos do sistema convencional, que consiste de um reservatório de água fria e do sistema de aquecimento solar.

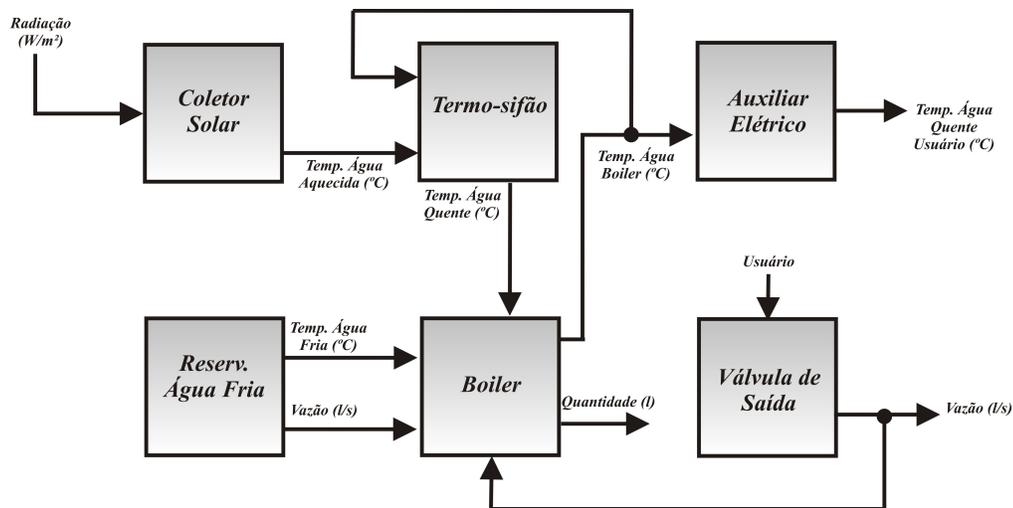


Fig. 3.8: Diagrama de blocos de um sistema convencional.

A seguir cada bloco do sistema modelado será descrito detalhadamente.

3.2.2.1 Reservatório de Água Fria

O reservatório de água fria utilizado neste modelo é idêntico ao utilizado no modelo com controlador *fuzzy* 3.2.1.1. No entanto, neste caso como o *boiler* é alimentado com água fria sempre que há saída de água quente. A mesma vazão de 0,083 l/s adotada na saída do chuveiro foi adotada como a vazão de entrada de água fria no *boiler*.

3.2.2.2 Válvula de Água Fria

O controle da entrada de água fria é realizado por uma válvula que por sua vez é aberta proporcionalmente a saída sempre que um banho iniciar, de maneira que haja ao mesmo tempo entrada e saída de água constantes no *boiler*, para que este mantenha-se sempre cheio.

3.2.2.3 Boiler

Foi utilizado o mesmo *boiler* e as mesmas considerações térmicas do modelo com controlador *fuzzy* 3.2.1.3. No entanto, quando um banho tem início, a entrada de água fria acontece na mesma proporção da saída de água quente, de maneira que a quantidade total de água no *boiler* permaneça constante em 500 litros. A temperatura da água por sua vez diminui, sendo a nova temperatura encontrada utilizando-se a Equação do equilíbrio térmico, dada pela Equação 3.1.

Capítulo 4

Análise dos Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são realizadas diversas simulações, sendo que o principal objetivo é comparar os dois sistemas modelados, e verificar se realmente a eficiência do sistema com controlador *fuzzy* é superior.

Para a realização da comparação utilizamos a radiação solar diária dada pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) [23] obtidos na cidade de São Carlos - SP, nos meses de janeiro e junho de 2008. Tais meses foram selecionados por apresentarem características distintas, sendo que, dentro destes meses, seis grupos com três dias cada foram analisados. Além disso, simulações com 15 combinações de banhos em diferentes horários foram realizadas, resultando em um total de 90 simulações, sendo que, a mais relevante de cada grupo é apresentada neste capítulo.

4.2 Situações Analisadas

Inicialmente o sistema é ajustado, sendo que, nos três primeiros casos consideramos uma radiação solar cujo valor máximo atinge 490 W/m^2 , sendo este valor uma média do mês de junho de 2008, e nos três últimos uma radiação solar cujo valor máximo atinge 605 W/m^2 , uma média do mês de janeiro de 2008.

A temperatura considerada para a água no reservatório de água fria varia de caso para caso. Esta, por sua vez, é baseada na temperatura ambiente média medida pelo CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) [24] nos meses de janeiro e junho na cidade de São Carlos - SP. A temperatura mínima desejada da água para o banho foi de 40°C para os três primeiros casos, visto que estes representam uma análise típica de inverno, e de 37°C para os três últimos que, por sua vez, representam uma análise típica de verão.

4.2.1 Caso # 1

4.2.1.1 Descrição

Neste caso, os dias 23, 24 e 25 de Junho de 2008 foram simulados. O grupo de dias apresentou radiações ruins, atingindo seus pontos máximos em 428 W/m^2 , 66 W/m^2 e 216 W/m^2 respectivamente, de acordo com as Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, nas quais os mapas representam uma média da radiação diária em W/m^2 e os gráficos representam uma curva da radiação diária.

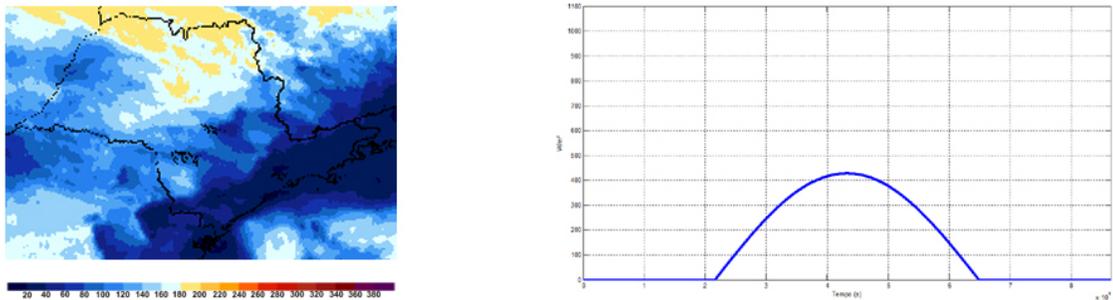


Fig. 4.1: 23 de junho de 2008.

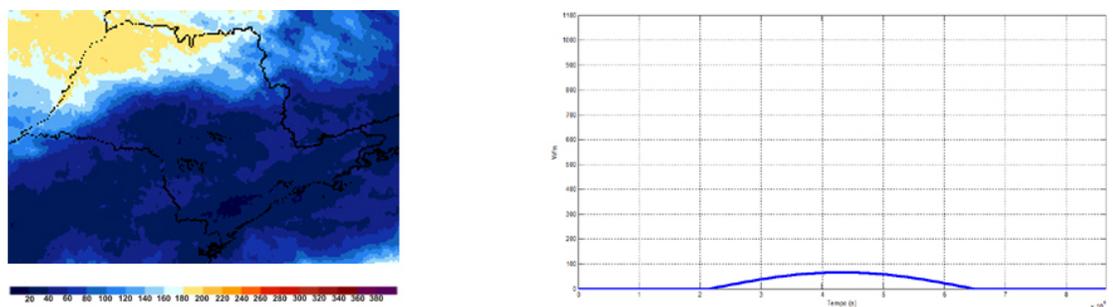


Fig. 4.2: 24 de junho de 2008.

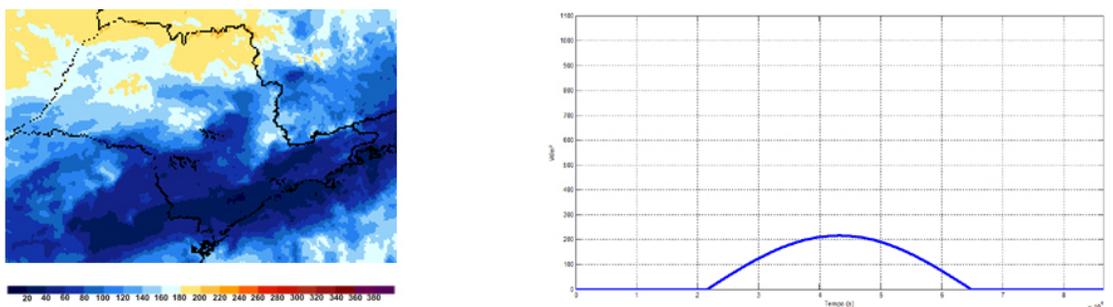


Fig. 4.3: 25 de junho de 2008.

Para esse grupo, a temperatura da água no reservatório de água fria considerada foi de 20°C, variando $\pm 1,5^\circ\text{C}$ ao longo do dia. Também foram tomados quatro banhos diários, com duração de 10 minutos cada, sempre nos mesmos horários, sendo dois pela manhã (5:00 hs e 6:00 hs), um à tarde (16:00 hs) e um à noite (21:00 hs).

4.2.1.2 Análise do Sistema Convencional

Após o ajuste inicial do sistema a temperatura da água no *boiler* atingiu 41,9°C. Na manhã do primeiro dia (23 de junho) dois banhos foram tomados provocando uma queda na temperatura e o acionamento do auxiliar elétrico no segundo banho. Outros dois banhos foram tomados, sendo um à tarde e o outro à noite, nos quais o auxiliar elétrico permaneceu ligado, uma vez que a radiação solar recebida durante o dia não foi suficiente para aquecer a água até a temperatura mínima desejada.

No início do segundo dia (24 de junho) a temperatura da água no *boiler* era de 35,8°C, novamente foram tomados dois banhos pela manhã, nos quais o auxiliar elétrico permaneceu ligado. Outros dois banhos foram tomados, um à tarde e outro à noite, e novamente o auxiliar elétrico permaneceu ligado, pois este foi o dia de pior radiação do grupo.

Na manhã do terceiro dia (25 de junho) a temperatura da água no *boiler* era de 30,3°C. Como nos dias anteriores, quatro banhos foram tomados (dois pela manhã, um à tarde e o outro à noite) e em todos eles, o auxiliar elétrico permaneceu ligado. Tais resultados podem ser visualizados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 que mostram a quantidade e a temperatura da água no *boiler* e a posição do auxiliar elétrico nos três dias de simulação.

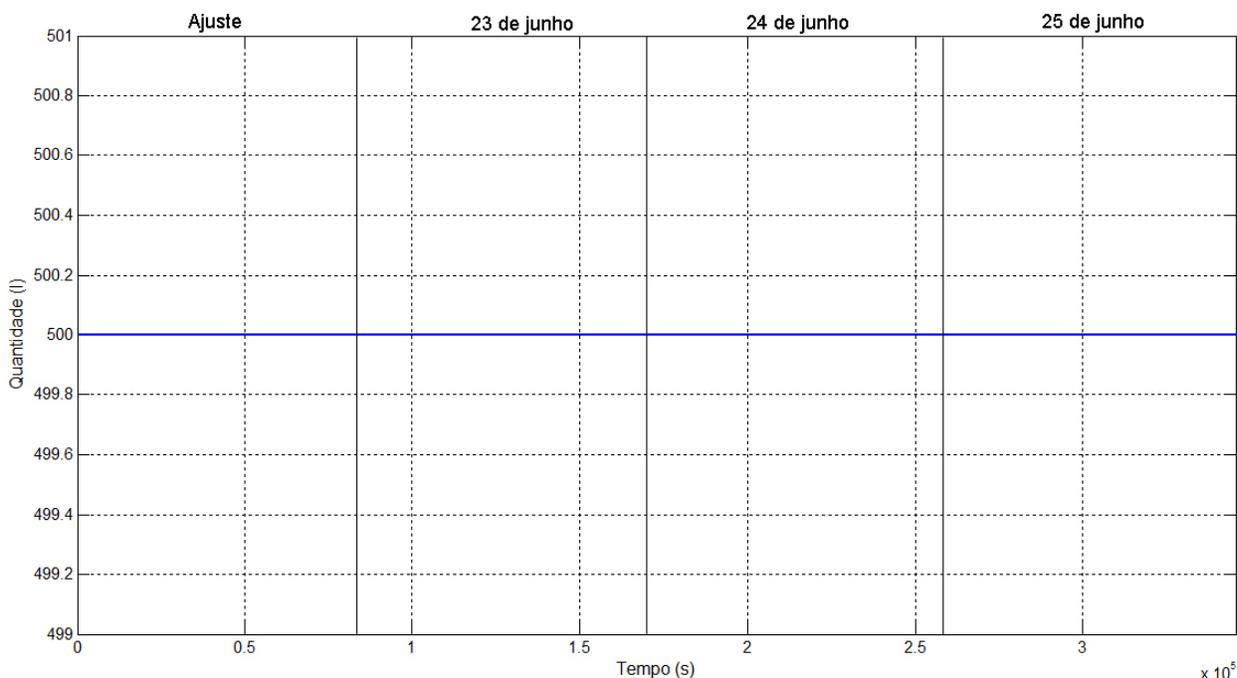


Fig. 4.4: Quantidade de água no *boiler*.

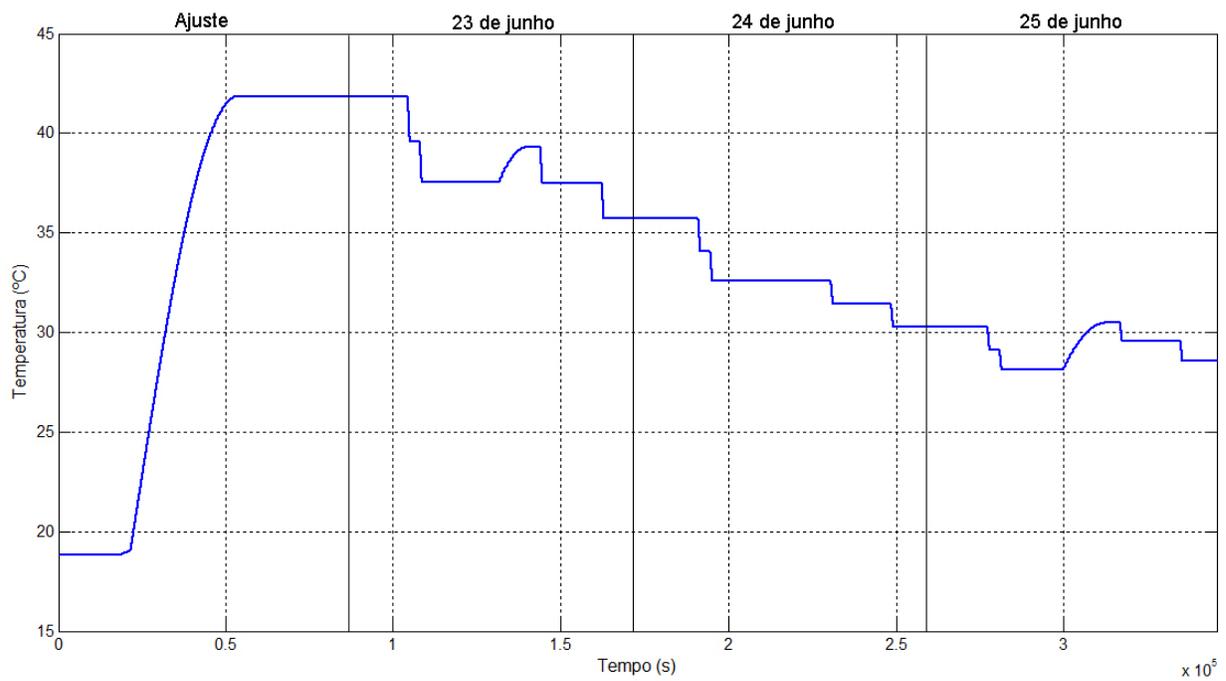
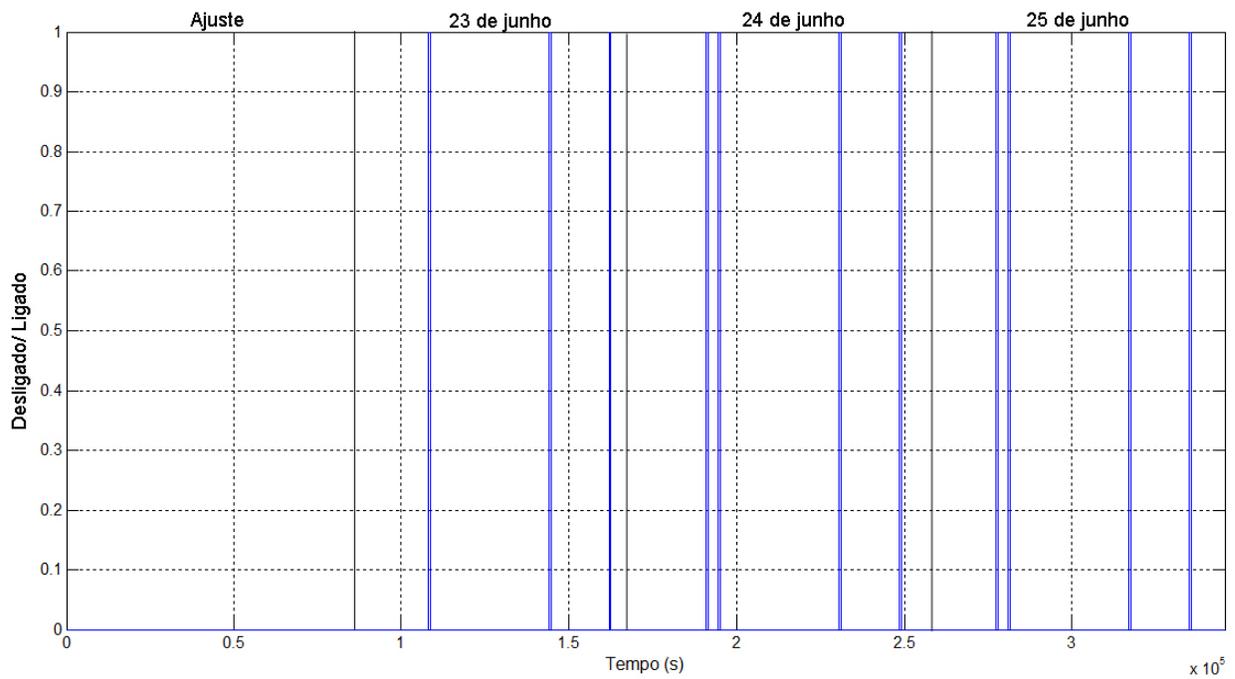
Fig. 4.5: Temperatura da água no *boiler*.

Fig. 4.6: Auxiliar elétrico.

Para uma melhor visualização, os dados apresentados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 estão sintetizados na Tabela 4.1, sendo que, os valores da quantidade e da temperatura da água no *boiler* são referentes aos valores obtidos no passo anterior ao início do banho.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
23	05:00	05:10	500	41,9	00:00
23	06:00	06:10	500	39,6	10:00
23	16:00	16:10	500	39,4	10:00
23	21:00	21:10	500	37,6	10:00
24	05:00	05:10	500	35,8	10:00
24	06:00	06:10	500	34,1	10:00
24	16:00	16:10	500	32,6	10:00
24	21:00	21:10	500	31,5	10:00
25	05:00	05:10	500	30,3	10:00
25	06:00	06:10	500	29,2	10:00
25	16:00	16:10	500	30,5	10:00
25	21:00	21:10	500	29,6	10:00

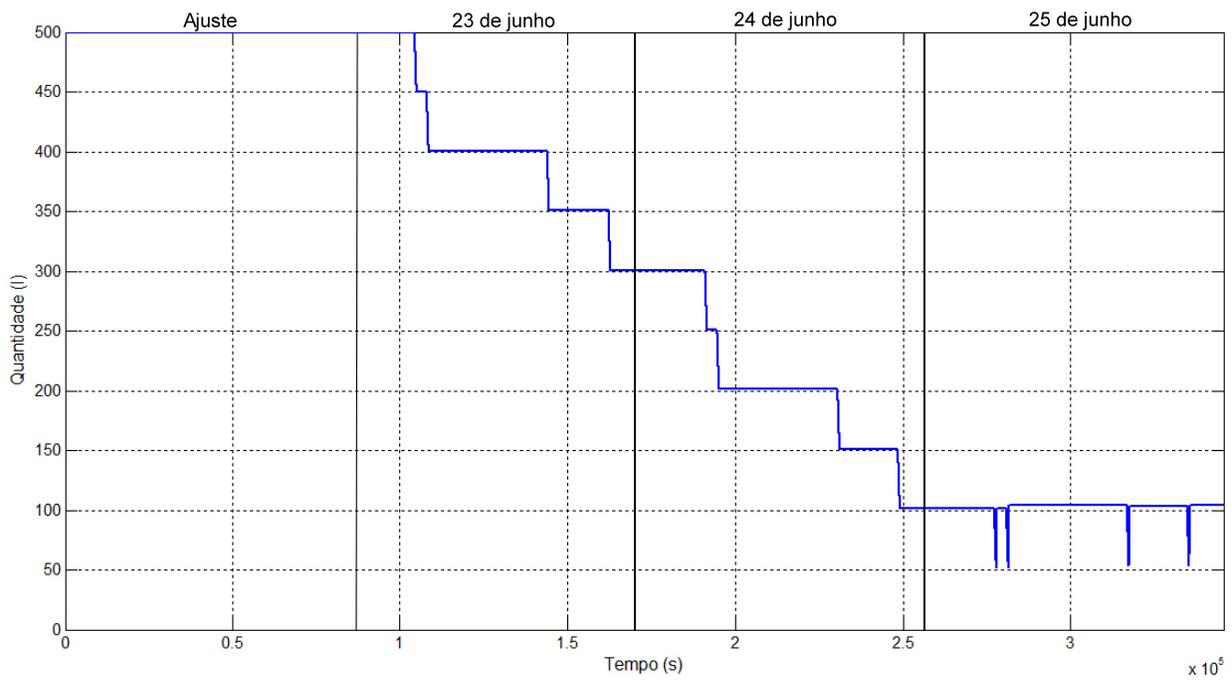
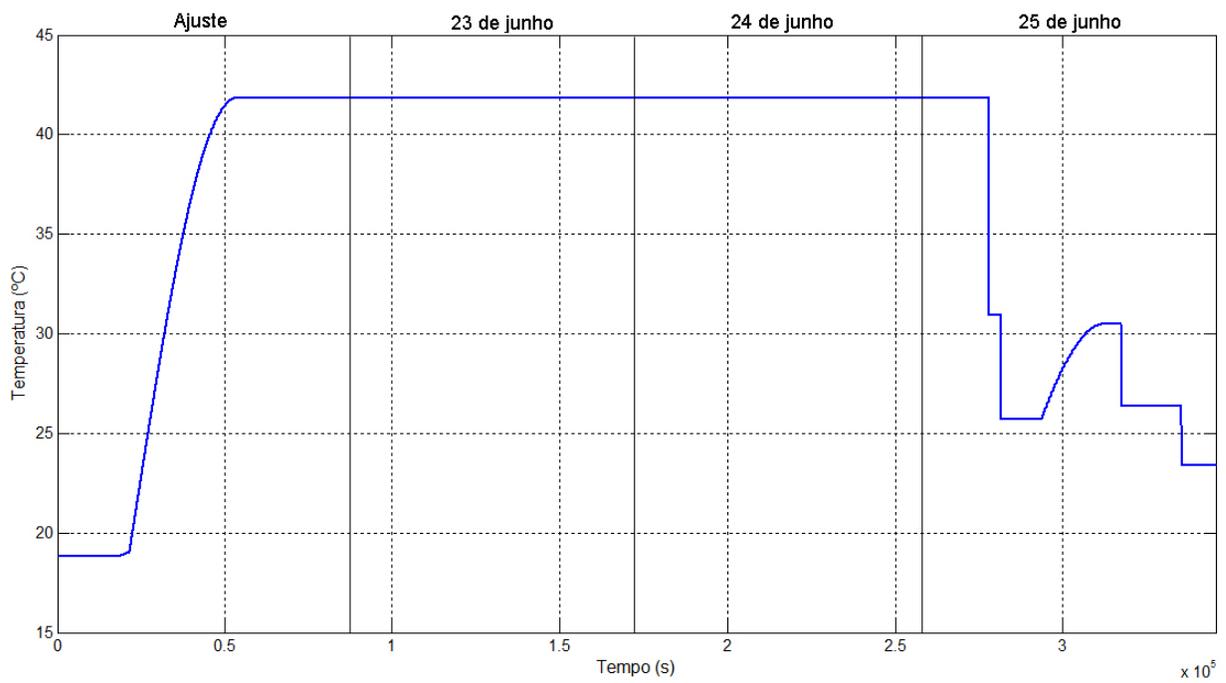
Tab. 4.1: Sistema convencional.

4.2.1.3 Análise do Sistema com Controle *Fuzzy*

Como no sistema convencional, após o ajuste do sistema a temperatura da água no *boiler* atingiu 41,9°C. Na manhã do primeiro dia (23 de junho) o *boiler* encontrava-se completamente cheio (500 litros), dois banhos foram tomados pela manhã, diminuindo a quantidade de água para 400 litros, quantidade que permaneceu até o início do banho da tarde. Considerando-se que a radiação apresentada durante o dia foi ruim, não permitindo a entrada de água, à noite mais um banho foi tomado e a quantidade de água no *boiler* caiu para 300 litros.

No segundo dia (24 de junho) a temperatura da água ainda era de 41,9°C, permanecendo inalterada até o final do dia, já que este apresentou a pior radiação do grupo. Após os quatro banhos, a quantidade de água no *boiler* passou a ser 100 litros.

Na manhã do terceiro dia (25 de junho) a temperatura da água no *boiler* permanecia 41,9°C. Como nos dias anteriores, dois banhos foram tomados pela manhã, no entanto, após o primeiro banho a quantidade mínima de água foi atingida, causando a entrada da mesma, o que provocou uma queda na temperatura acionando o auxiliar elétrico no segundo banho. A radiação foi ruim durante todo o dia, assim a temperatura da água permaneceu abaixo da mínima desejada, conseqüentemente, o auxiliar elétrico foi acionado novamente nos banhos da tarde e da noite. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 ilustram esta simulação.

Fig. 4.7: Quantidade de água no *boiler*.Fig. 4.8: Temperatura da água no *boiler*.

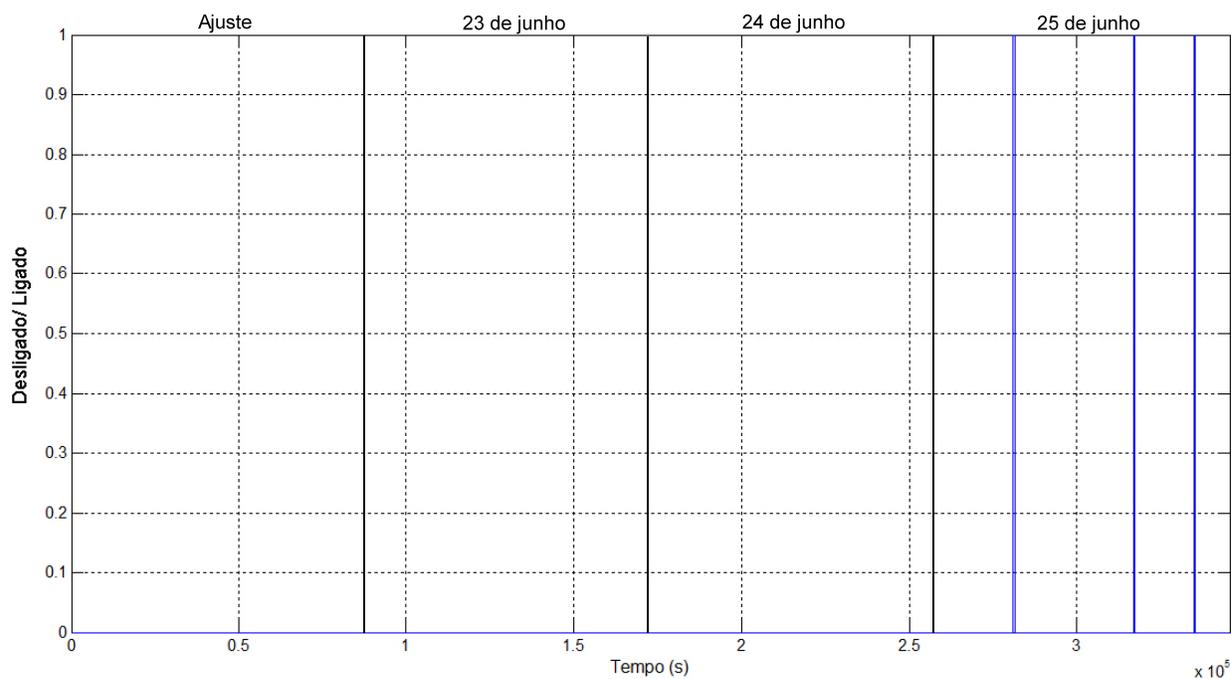


Fig. 4.9: Auxiliar elétrico.

A Tabela 4.2 segue as mesmas características da Tabela 4.1 e sintetiza os dados apresentados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
23	05:00	05:10	500	41,9	00:00
23	06:00	06:10	450	41,9	00:00
23	16:00	16:10	400	41,9	00:00
23	21:00	21:10	350	41,9	00:00
24	05:00	05:10	300	41,9	00:00
24	06:00	06:10	250	41,9	00:00
24	16:00	16:10	200	41,9	00:00
24	21:00	21:10	150	41,9	00:00
25	05:00	05:10	100	41,9	00:00
25	06:00	06:10	100	31,0	10:00
25	16:00	16:10	100	30,5	10:00
25	21:00	21:10	100	26,4	10:00

Tab. 4.2: Sistema com controle *fuzzy*.

4.2.1.4 Comparação entre os Sistemas

Para comparar as diferenças entre os sistemas apresentados, foi utilizada a Tabela 4.3 e um auxiliar elétrico de 5,5 *kW* de potência máxima.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Aux. Ligado - Fuzzy (minutos)	Aux. Ligado - Conv. (minutos)
23	05:00	05:10	00:00	00:00
23	06:00	06:10	00:00	10:00
23	16:00	16:10	00:00	10:00
23	21:00	21:10	00:00	10:00
24	05:00	05:10	00:00	10:00
24	06:00	06:10	00:00	10:00
24	16:00	16:10	00:00	10:00
24	21:00	21:10	00:00	10:00
25	05:00	05:10	00:00	10:00
25	06:00	06:10	10:00	10:00
25	16:00	16:10	10:00	10:00
25	21:00	21:10	10:00	10:00

Tab. 4.3: Comparação entre os sistemas modelados.

Nota-se que o tempo total em que o auxiliar elétrico permaneceu ligado durante os três dias de simulação no sistema com controle *fuzzy* foi de 30 minutos, o que representa um consumo de 2,75 *kW.h*. Já o sistema convencional permaneceu 110 minutos ligado durante os três dias de simulação, o que representa um consumo de 10,08 *kW.h*. Portanto, o sistema com controle *fuzzy* proporcionou neste caso, uma economia de 7,33 *kW.h* quando comparado a um sistema convencional.

No entanto, se no sistema com controle *fuzzy* colocarmos um controle de temperatura fazendo com que a água seja aquecida somente até 40°C, temperatura mínima desejada pelo usuário, a economia obtida é ainda maior sendo de 8,22 *kW.h* neste caso. Uma vez que o gasto no sistema convencional é de 10,08 *kW.h* e no sistema com controle *fuzzy* é de 1,86 *kW.h*, valor encontrado através da Equação fundamental da calorimetria 4.1.

$$Q = m.c.\Delta t \quad (4.1)$$

Na qual:

- m = massa da água;
- c = calor específico da água (4,2 kJ/kg.K);
- Δt = variação de temperatura sofrida pela água.

Finalizando a análise deste caso, a Figura 4.10 mostra um comparativo entre os dois sistemas simulados, com todas as combinações de banho propostas, utilizando as características mencionadas no início do item 4.2.1.1.

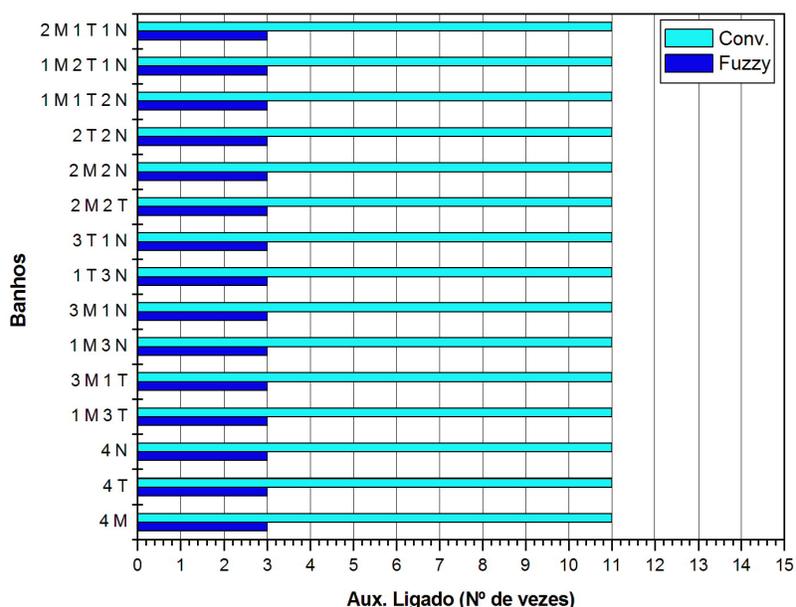


Fig. 4.10: Comparação entre os sistemas com todas as combinações de banho.

É possível perceber que independente do horário do banho no sistema com controle *fuzzy* o auxiliar elétrico é acionado três vezes e no sistema convencional é acionado 11 vezes, comprovando a eficiência do sistema proposto em dias cuja radiação é ruim.

4.2.2 Caso # 2

4.2.2.1 Descrição

Neste caso foram simulados os dias 06, 07 e 08 de Junho de 2008. O grupo apresentou radiações médias, atingindo seus pontos máximos em 461 W/m^2 , 442 W/m^2 e 574 W/m^2 respectivamente, como é possível observar nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

Para esse grupo, a temperatura da água no reservatório de água fria foi considerada de $20,5^\circ\text{C}$, variando $\pm 1,5^\circ\text{C}$ durante o dia. Foram tomados quatro banhos diários com duração de 10 minutos cada sempre nos mesmos horários, sendo um pela manhã (6:00 hs) e três à noite (20:00 hs, 20:30 hs e 21:00 hs).

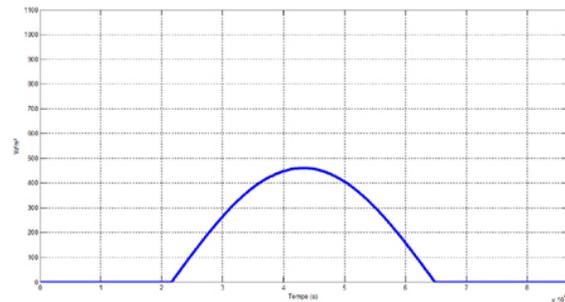
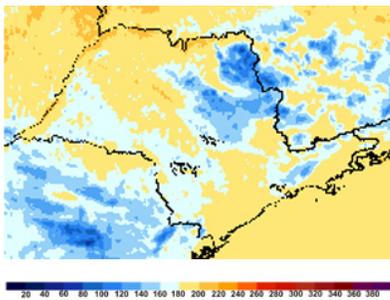


Fig. 4.11: 06 de junho de 2008.

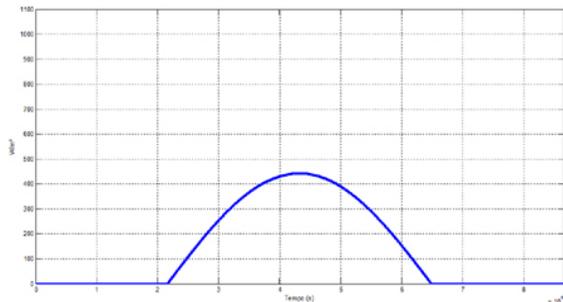
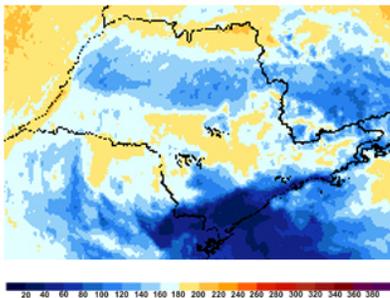


Fig. 4.12: 07 de junho de 2008.

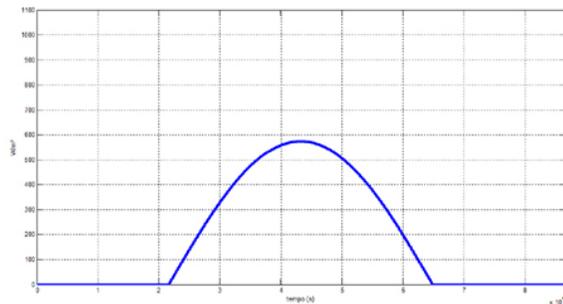
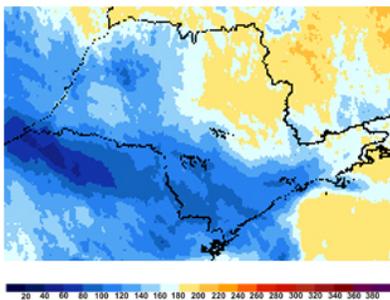


Fig. 4.13: 08 de junho de 2008.

4.2.2.2 Análise do Sistema Convencional

A temperatura da água no *boiler* atingiu 42,4°C após o ajuste do sistema. Na manhã do primeiro dia (06 de junho) um banho foi tomado e o auxiliar elétrico não precisou ser acionado. À noite mais três banhos foram tomados e considerando que a radiação apresentada durante o dia não foi boa o auxiliar elétrico precisou ser acionado nos dois últimos banhos.

No início do segundo dia (07 de junho) a temperatura da água no *boiler* era de 35,6°C, portanto o auxiliar elétrico foi ligado. A noite o auxiliar elétrico foi novamente acionado nos dois últimos banhos, uma vez que a radiação solar recebida no dia também não foi boa.

No início do terceiro dia (08 de junho) a temperatura da água no *boiler* era de 35,1°C, o que fez com que o auxiliar elétrico fosse acionado no banho da manhã. A radiação apresentada durante o dia foi suficiente para aquecer a água a uma temperatura superior à mínima desejada, assim no início do primeiro banho da noite a temperatura no *boiler* era de 46,0°C, de modo que o auxiliar não precisou ser acionado. Como no caso # 1, os gráficos foram analisados e seus resultados estão sintetizados na Tabela 4.4.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
06	06:00	06:10	500	42,4	00:00
06	20:00	20:10	500	41,2	00:00
06	20:30	20:40	500	39,2	10:00
06	21:00	21:10	500	37,3	10:00
07	06:00	06:10	500	35,6	10:00
07	20:00	20:10	500	40,5	00:00
07	20:30	20:40	500	38,5	10:00
07	21:00	21:10	500	36,7	10:00
08	06:00	06:10	500	35,1	10:00
08	20:00	20:10	500	46,0	00:00
08	20:30	20:40	500	43,4	00:00
08	21:00	21:10	500	41,1	00:00

Tab. 4.4: Sistema convencional.

4.2.2.3 Análise do Sistema com Controle *Fuzzy*

A temperatura da água no *boiler* era de 42,4°C após o ajuste do sistema. No primeiro dia (06 de junho) um banho foi tomado pela manhã, a radiação apresentada durante o dia não foi suficiente para aquecer a água a uma temperatura superior à atingida anteriormente, portanto a temperatura permaneceu 42,4°C nos três banhos da noite.

No segundo dia (07 de junho) a quantidade de água no *boiler* pela manhã era de 300 litros e a temperatura permaneceu 42,4°C nos quatro banhos, já que não houve entrada de água e a radiação recebida durante o dia não foi suficiente para que a temperatura superasse a atingida anteriormente.

No terceiro dia (08 de junho) a temperatura da água no *boiler* continuava de 42,4°C. Após o término do banho da manhã a quantidade de água no *boiler* atingiu o seu mínimo, havendo entrada de água. A radiação do dia aqueceu a água a 41,7°C, temperatura suficiente para o não acionamento do auxiliar elétrico nos banhos da noite. Os gráficos referentes a esta simulação foram analisados e seus resultados estão sintetizados na Tabela 4.5.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
06	06:00	06:10	500	42,4	00:00
06	20:00	20:10	450	42,4	00:00
06	20:30	20:40	400	42,4	00:00
06	21:00	21:10	350	42,4	00:00
07	06:00	06:10	300	42,4	00:00
07	20:00	20:10	250	42,4	00:00
07	20:30	20:40	200	42,4	00:00
07	21:00	21:10	150	42,4	00:00
08	06:00	06:10	100	42,4	00:00
08	20:00	20:10	200	41,7	00:00
08	20:30	20:40	150	41,7	00:00
08	21:00	21:10	100	41,7	00:00

Tab. 4.5: Sistema com controle *fuzzy*.

4.2.2.4 Comparação entre os Sistemas

Uma vez mais o sistema com controle *fuzzy* se mostrou bastante eficiente quando comparado ao convencional. Assim, para uma melhor visualização, a Tabela 4.6 demonstra o tempo em que o auxiliar elétrico permaneceu ligado nos dois sistemas modelados.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Aux. Ligado - Fuzzy (minutos)	Aux. Ligado - Conv. (minutos)
06	06:00	06:10	00:00	00:00
06	20:00	20:10	00:00	00:00
06	20:30	20:40	00:00	10:00
06	21:00	21:10	00:00	10:00
07	06:00	06:10	00:00	10:00
07	20:00	20:10	00:00	00:00
07	20:30	20:40	00:00	10:00
07	21:00	21:10	00:00	10:00
08	06:00	06:10	00:00	10:00
08	20:00	20:10	00:00	00:00
08	20:30	20:40	00:00	00:00
08	21:00	21:10	00:00	00:00

Tab. 4.6: Comparação entre os sistemas modelados.

Por meio da Tabela 4.6, nota-se que o auxiliar elétrico não foi acionado durante os três dias de simulação no sistema com controle *fuzzy*, já no sistema convencional, fora acionado seis vezes, permanecendo ligado durante 60 minutos. Tendo como referência o mesmo auxiliar elétrico utilizado no

caso # 1, o consumo foi de $5,50 \text{ kW.h}$. Assim, temos que o sistema com controle *fuzzy* proporcionou neste caso uma economia de $5,50 \text{ kW.h}$ quando comparado ao sistema convencional.

A Figura 4.14 mostra um comparativo entre os dois sistemas simulados, com todas as combinações de banho propostas, utilizando as características mencionadas no início do item 4.2.2.1.

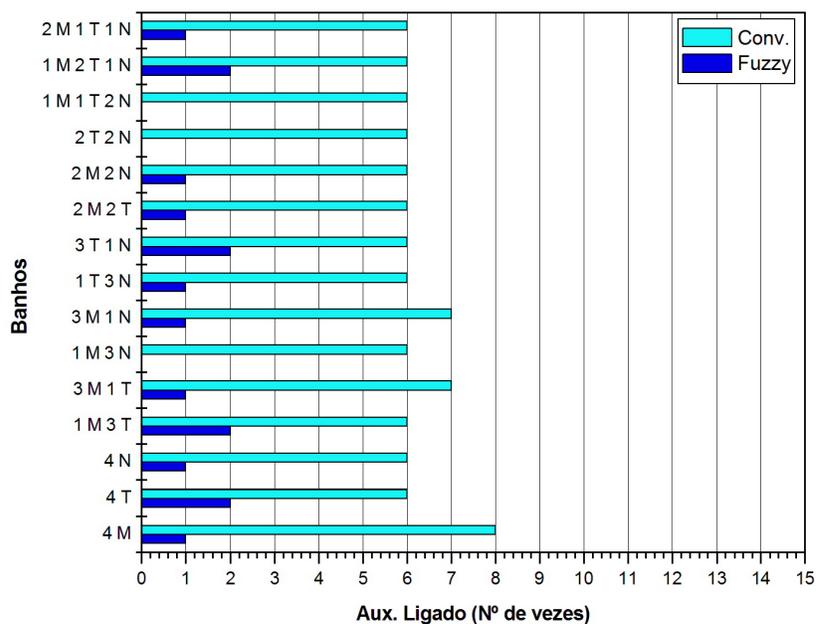


Fig. 4.14: Comparação entre os sistemas com todas as combinações de banho.

Neste caso, nota-se que a eficiência do sistema com controle *fuzzy* aumenta ou diminui em relação ao sistema convencional dependendo dos horários dos banhos.

4.2.3 Caso # 3

4.2.3.1 Descrição

Foram feitas simulações durante os dias 16, 17 e 18 de Junho de 2008. O grupo apresentou boas radiações, atingindo seus pontos máximos em 556 W/m^2 , 530 W/m^2 e 570 W/m^2 respectivamente, como demonstra as Figuras 4.15, 4.16 e 4.17.

Para este grupo, a temperatura da água no reservatório de água fria foi considerada de $21,5^\circ\text{C}$ variando $\pm 1,5^\circ\text{C}$ durante o dia. Também, foram tomados quatro banhos diários com duração de 10 minutos cada sempre nos mesmos horários, sendo três pela manhã (5:30 hs, 6:00 hs e 6:30 hs) e um à noite (20:00 hs).

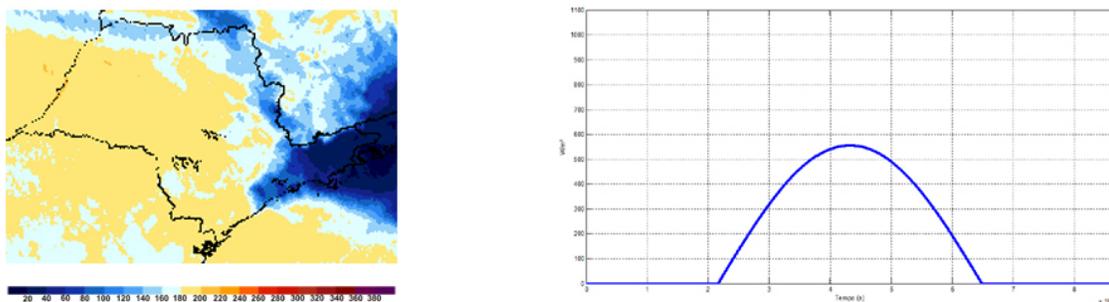


Fig. 4.15: 16 de junho de 2008.

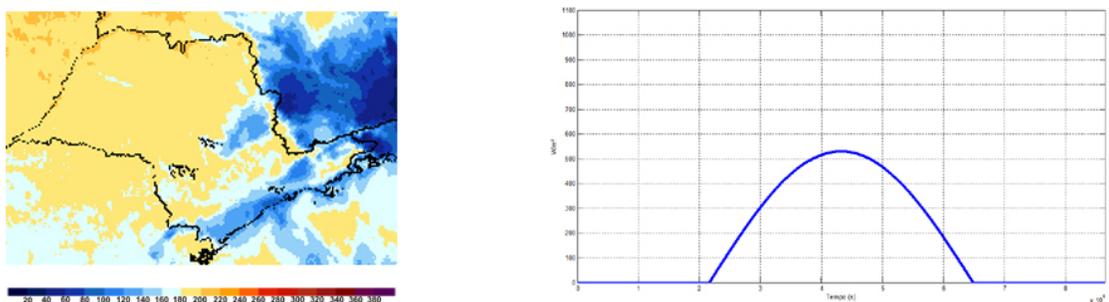


Fig. 4.16: 17 de junho de 2008.

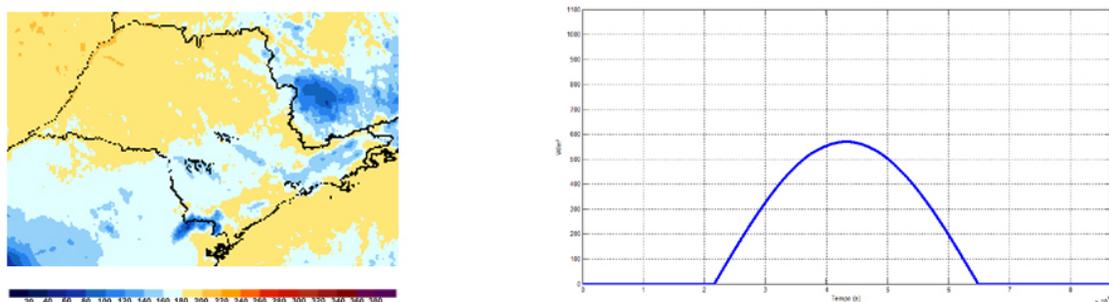


Fig. 4.17: 18 de junho de 2008.

4.2.3.2 Análise do Sistema Convencional

Este grupo apresentou algumas das melhores radiações do mês de junho, assim, a temperatura da água no *boiler*, após o ajuste do sistema era de $43,4^{\circ}\text{C}$. Na manhã do primeiro dia (16 de junho) três banhos foram tomados pela manhã, sendo que, o auxiliar elétrico precisou ser acionado no último banho. Devido à boa radiação apresentada durante o dia, no banho da noite a água já estava novamente aquecida a uma temperatura superior à mínima desejada.

No início do segundo dia (17 de junho) a temperatura da água no *boiler* era de $43,7^{\circ}\text{C}$, portanto o auxiliar elétrico permaneceu ligado apenas durante o último banho da manhã, novamente a radiação

apresentada no dia foi suficiente para aquecer a água a uma temperatura superior à mínima desejada, não sendo necessário o acionamento do auxiliar elétrico durante o banho da noite.

No terceiro dia (18 de junho) a temperatura da água no *boiler* era de 42,8°C, o que fez com que o auxiliar elétrico fosse acionado apenas no último banho da manhã, a radiação apresentada durante o dia aqueceu a água a uma temperatura de 47,1°C, portanto não houve a necessidade de acionar o auxiliar elétrico no banho da noite. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.7.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
16	05:30	05:40	500	43,4	00:00
16	06:00	06:10	500	41,2	00:00
16	06:30	06:40	500	39,1	10:00
16	20:00	20:10	500	46,1	00:00
17	05:30	05:40	500	43,7	00:00
17	06:00	06:10	500	41,4	00:00
17	06:30	06:40	500	39,3	10:00
17	20:00	20:10	500	45,1	00:00
18	05:30	05:40	500	42,8	00:00
18	06:00	06:10	500	40,6	00:00
18	06:30	06:40	500	38,6	10:00
18	20:00	20:10	500	47,1	00:00

Tab. 4.7: Sistema convencional.

4.2.3.3 Análise do Sistema com Controle *Fuzzy*

A temperatura da água no *boiler* após o ajuste do sistema era de 43,4°C. Na manhã do primeiro dia (16 de junho) três banhos foram tomados. Devido à boa radiação recebida durante o dia, a temperatura da água no *boiler* para o banho da noite subiu para 46,1°C, não havendo entrada de água neste dia.

No início do segundo dia (17 de junho) o *boiler* possuía 300 litros e a temperatura da água continuava sendo de 46,1°C. Os banhos da manhã foram tomados e houve entrada de água durante o dia, assim a temperatura era de 45,1°C no início do banho da noite.

No terceiro dia (18 de junho) a quantidade de água no *boiler* era de 200 litros a uma temperatura de 45,1°C. Tomou-se os três banhos da manhã e ao longo do dia houve novamente entrada de água, assim a temperatura para o banho da noite era de 42,9°C. Os resultados referentes a esta simulação estão representados na Tabela 4.8.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
16	05:30	05:40	500	43,4	00:00
16	06:00	06:10	450	43,4	00:00
16	06:30	06:40	400	43,4	00:00
16	20:00	20:10	350	46,1	00:00
17	05:30	05:40	300	46,1	00:00
17	06:00	06:10	250	46,1	00:00
17	06:30	06:40	200	46,1	00:00
17	20:00	20:10	250	45,1	00:00
18	05:30	05:40	200	45,1	00:00
18	06:00	06:10	150	45,1	00:00
18	06:30	06:40	100	45,1	00:00
18	20:00	20:10	200	42,9	00:00

Tab. 4.8: Sistema com controle *fuzzy*.

4.2.3.4 Comparação entre os Sistemas

Embora este grupo tenha apresentado radiações boas, o sistema com controle *fuzzy* ainda se mostra eficaz quando comparado ao convencional, como é possível observar na Tabela 4.9.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Aux. Ligado - Fuzzy (minutos)	Aux. Ligado - Conv. (minutos)
16	05:30	05:40	00:00	00:00
16	06:00	06:10	00:00	00:00
16	06:30	06:40	00:00	10:00
16	20:00	20:10	00:00	00:00
17	05:30	05:40	00:00	00:00
17	06:00	06:10	00:00	00:00
17	06:30	06:40	00:00	10:00
17	20:00	20:10	00:00	00:00
18	05:30	05:40	00:00	00:00
18	06:00	06:10	00:00	00:00
18	06:30	06:40	00:00	10:00
18	20:00	20:10	00:00	00:00

Tab. 4.9: Comparação entre os sistemas modelados.

Nota-se que o auxiliar elétrico não foi acionado durante os três dias de simulação no sistema com controle *fuzzy*, já no sistema convencional o auxiliar foi acionado três vezes, permanecendo ligado durante 30 minutos. Tendo como referência o mesmo auxiliar elétrico utilizado nos casos anteriores,

o consumo foi de $2,75 \text{ kW.h}$. Assim, concluímos que o sistema com controle *fuzzy* ofereceu, neste caso, uma economia de $2,75 \text{ kW.h}$ quando comparado ao sistema convencional.

A Figura 4.18 mostra um comparativo entre os dois sistemas simulados, com todas as combinações de banho propostas, utilizando as características mencionadas no início do item 4.2.3.1.

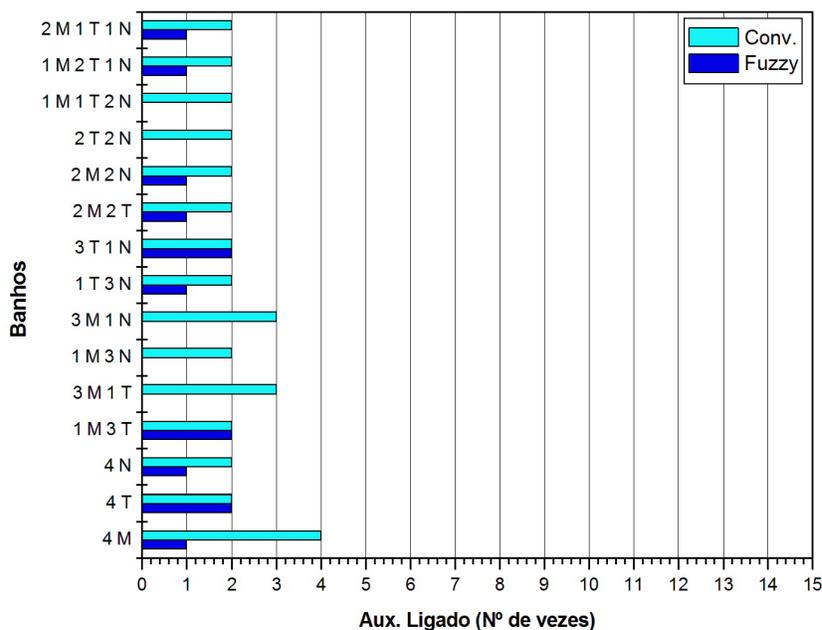


Fig. 4.18: Comparação entre os sistemas com todas as combinações de banho.

É possível perceber que em alguns horários tanto o sistema com controle *fuzzy* quanto o sistema convencional acionaram o auxiliar elétrico o mesmo número de vezes, isto porque as radiações apresentadas neste caso foram relativamente boas.

4.2.4 Caso # 4

4.2.4.1 Introdução

Neste caso os dias 01, 02 e 03 de Janeiro de 2008 foram simulados. O grupo apresentou radiações médias, atingindo seus pontos máximos em 548 W/m^2 , 457 W/m^2 e 676 W/m^2 respectivamente, conforme as Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

Para este grupo, a temperatura da água no reservatório de água fria foi considerada de $26,5^\circ\text{C}$ variando $\pm 1,5^\circ\text{C}$ durante o dia. Foram tomados quatro banhos diários com duração de 10 minutos cada, sempre nos mesmos horários, sendo dois pela manhã (5:00 hs e 6:00 hs) e dois à noite (20:30 hs e 21:00 hs).

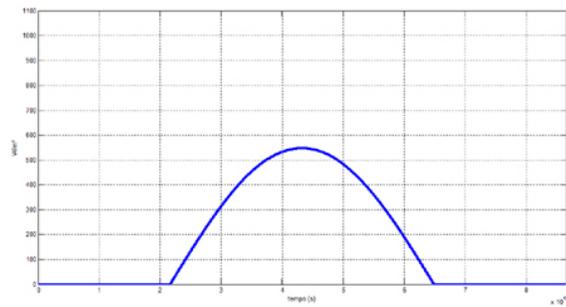
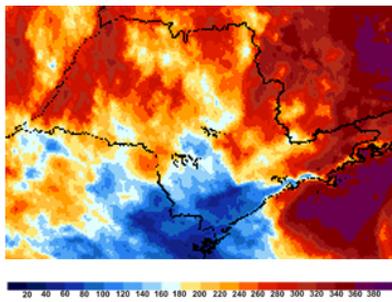


Fig. 4.19: 01 de janeiro de 2008.

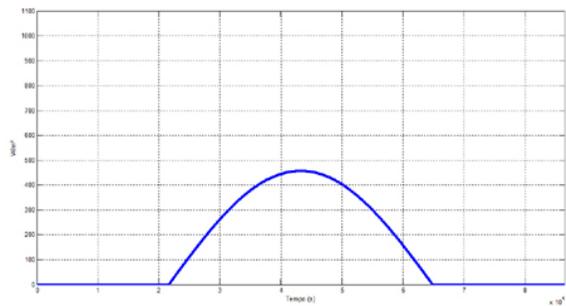
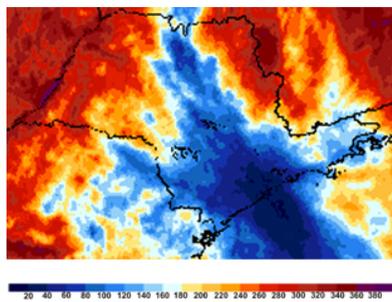


Fig. 4.20: 02 de janeiro de 2008.

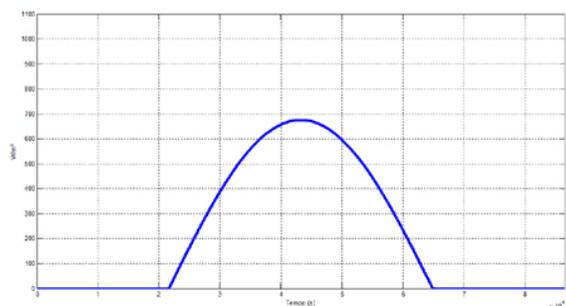
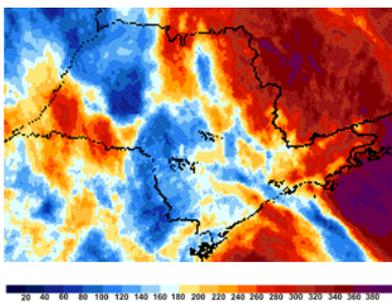


Fig. 4.21: 03 de janeiro de 2008.

4.2.4.2 Análise do Sistema Convencional

A temperatura da água no *boiler* após o ajuste do sistema era de $53,3^{\circ}\text{C}$. No primeiro dia (01 de janeiro), dois banhos foram tomados pela manhã e outros dois banhos foram tomados à noite, sem o acionamento do auxiliar elétrico.

Na manhã do segundo dia (02 de janeiro) a temperatura da água no *boiler* encontrava-se a $46,3^{\circ}\text{C}$. Novamente os quatro banhos do dia foram tomados sem a necessidade de acionamento do auxiliar elétrico.

No início do terceiro dia (03 de janeiro) a temperatura da água era $43,2^{\circ}\text{C}$, os dois banhos da

manhã foram tomados e devido a boa radiação apresentada durante o dia, no início do primeiro banho da noite a temperatura era de 56,4°C. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.10.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
01	05:00	05:10	500	53,3	00:00
01	06:00	06:10	500	50,5	00:00
01	20:30	20:40	500	50,9	00:00
01	21:00	21:10	500	48,5	00:00
02	05:00	05:10	500	46,3	00:00
02	06:00	06:10	500	44,2	00:00
02	20:30	20:40	500	47,2	00:00
02	21:00	21:10	500	45,1	00:00
03	05:00	05:10	500	43,2	00:00
03	06:00	06:10	500	41,4	00:00
03	20:30	20:40	500	56,4	00:00
03	21:00	21:10	500	53,4	00:00

Tab. 4.10: Sistema convencional.

4.2.4.3 Análise do Sistema com Controle *Fuzzy*

Após o ajuste do sistema, a temperatura da água no *boiler* era de 53,3°C. No início do primeiro dia (01 de janeiro), dois banhos foram tomados pela manhã e dois à noite, não houve entrada de água e o auxiliar elétrico também não foi acionado.

No segundo dia (02 de janeiro) pela manhã a quantidade de água no *boiler* era de 300 litros e a temperatura permanecia de 53,3°C, os quatro banhos do dia foram tomados e novamente não houve entrada de água, de maneira que a temperatura permaneceu a mesma até o término do último banho.

No início do terceiro dia (03 de janeiro) a temperatura da água ainda era de 53,3°C, no entanto a quantidade era de apenas 100 litros, assim, para o segundo banho da manhã houve entrada de água e, embora a temperatura tenha caído, não foi necessário acionar o auxiliar elétrico. Durante o dia houve mais uma entrada de água, aquecida pela radiação apresentada durante o dia. Antes do início do primeiro banho da noite, a quantidade no *boiler* era de 200 litros e a temperatura era de 51,2°C, não havendo novamente necessidade de acionar o auxiliar elétrico. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.11.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
01	05:00	05:10	500	53,3	00:00
01	06:00	06:10	450	53,3	00:00
01	20:30	20:40	400	53,3	00:00
01	21:00	21:10	350	53,3	00:00
02	05:00	05:10	300	53,3	00:00
02	06:00	06:10	250	53,3	00:00
02	20:30	20:40	200	53,3	00:00
02	21:00	21:10	150	53,3	00:00
03	05:00	05:10	100	53,3	00:00
03	06:00	06:10	100	39,9	00:00
03	20:30	20:40	200	51,2	00:00
03	21:00	21:10	150	51,2	00:00

Tab. 4.11: Sistema com controle *fuzzy*.

4.2.4.4 Comparação entre os Sistemas

Por tratar-se de uma simulação feita no mês de janeiro, em que as radiações são boas, a temperatura da água do reservatório de água fria é mais elevada e a temperatura mínima desejada pelo usuário é menor do que no mês de junho, não houve diferença entre os dois sistemas modelados, como é possível observar na Tabela 4.12. Além disso, em ambos os sistemas não foi necessário acionar o auxiliar elétrico em nenhuma combinação de banho.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Aux. Ligado - Fuzzy (minutos)	Aux. Ligado - Conv. (minutos)
01	05:00	05:10	00:00	00:00
01	06:00	06:10	00:00	00:00
01	20:30	20:40	00:00	00:00
01	21:00	21:10	00:00	00:00
02	05:00	05:10	00:00	00:00
02	06:00	06:10	00:00	00:00
02	20:30	20:40	00:00	00:00
02	21:00	21:10	00:00	00:00
03	05:00	05:10	00:00	00:00
03	06:00	06:10	00:00	00:00
03	20:30	20:40	00:00	00:00
03	21:00	21:10	00:00	00:00

Tab. 4.12: Comparação entre os sistemas modelados.

4.2.5 Caso # 5

4.2.5.1 Introdução

Neste caso os dias 08, 09 e 10 de Janeiro de 2008 foram simulados. O grupo apresentou radiações excelentes, atingindo seus pontos máximos em 958 W/m^2 , 877 W/m^2 e 1016 W/m^2 respectivamente, como é possível ser observado nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24.

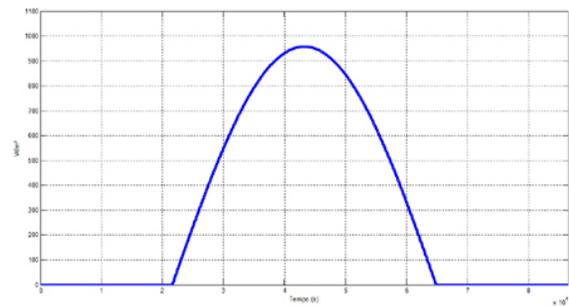
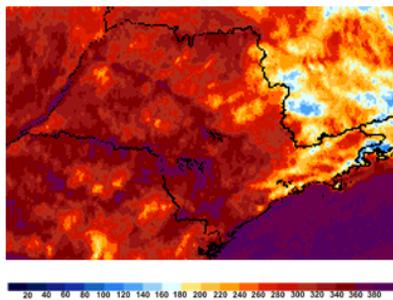


Fig. 4.22: 08 de janeiro de 2008.

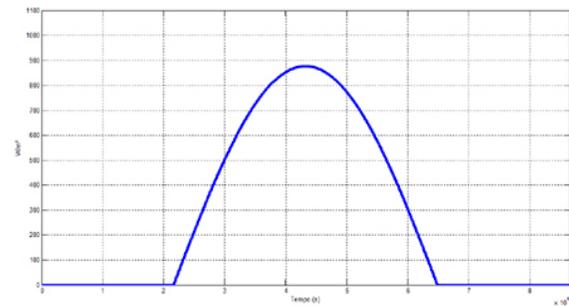
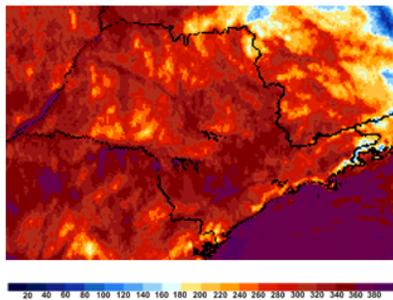


Fig. 4.23: 09 de janeiro de 2008.

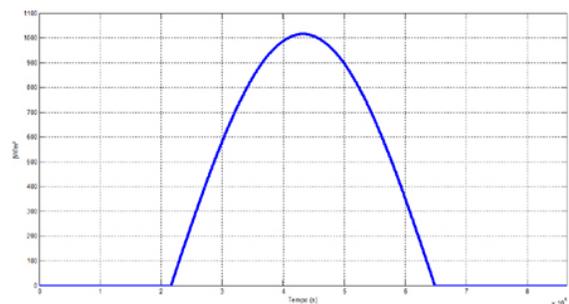
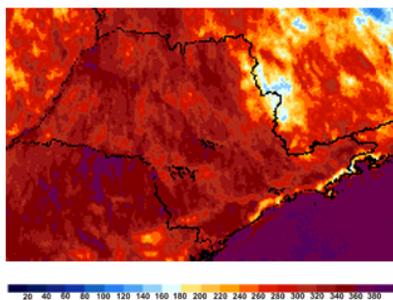


Fig. 4.24: 10 de janeiro de 2008.

Para este grupo, a temperatura da água no reservatório de água fria foi considerada de $27,5^{\circ}\text{C}$ variando $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ durante o dia. Sendo tomados quatro banhos diários com duração de 10 minutos cada sempre nos mesmos horários, todos à noite (20:00 hs, 20:30 hs, 21:00 hs e 21:30 hs).

4.2.5.2 Análise do Sistema Convencional

Este grupo apresentou algumas das melhores radiações do mês de janeiro, assim, a temperatura da água no *boiler* após o ajuste do sistema era de $54,3^{\circ}\text{C}$. O primeiro dia (08 de janeiro) apresentou uma radiação maior do que a utilizada para o ajuste do sistema, assim a temperatura da água era de $69,0^{\circ}\text{C}$ no início do primeiro banho, sendo que todos foram tomados à noite.

No início da noite do segundo dia (09 de janeiro) a temperatura da água no *boiler* era de $65,8^{\circ}\text{C}$, mais uma vez foram tomados quatro banhos sem o acionamento do auxiliar elétrico, já que a radiação apresentada durante o dia foi suficiente para aquecer a água a uma temperatura acima da mínima desejada.

O terceiro dia (10 de janeiro) apresentou a maior radiação do grupo, assim à noite, a temperatura da água no *boiler* era de $71,0^{\circ}\text{C}$, sendo os quatro banhos tomados sem a necessidade do auxiliar elétrico. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.13.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água ($^{\circ}\text{C}$)	Aux. Ligado (minutos)
08	20:00	20:10	500	69,0	00:00
08	20:30	20:40	500	64,9	00:00
08	21:00	21:10	500	61,2	00:00
08	21:30	21:40	500	57,8	00:00
09	20:00	20:10	500	65,8	00:00
09	20:30	20:40	500	62,0	00:00
09	21:00	21:10	500	58,5	00:00
09	21:30	21:40	500	55,4	00:00
10	20:00	20:10	500	71,0	00:00
10	20:30	20:40	500	67,3	00:00
10	21:00	21:10	500	63,3	00:00
10	21:30	21:40	500	59,7	00:00

Tab. 4.13: Sistema convencional.

4.2.5.3 Análise do Sistema com Controle Fuzzy

Como no sistema convencional, a temperatura da água no *boiler* era de $54,3^{\circ}\text{C}$ após o ajuste do sistema. O primeiro dia (08 de janeiro) apresentou uma radiação superior à utilizada para o ajuste, fazendo com que a temperatura atingisse $69,0^{\circ}\text{C}$, sendo esta a temperatura nos quatro banhos da noite.

No segundo dia (09 de janeiro) houve entrada de água no *boiler* durante o dia devido à boa radiação apresentada, de modo que a quantidade de água no início do primeiro banho era de 500

litros a uma temperatura de 65,8°C. Os quatro banhos foram tomados à noite e o auxiliar elétrico não precisou ser acionado.

O terceiro dia (10 de janeiro) apresentou a maior radiação do grupo. Houve entrada de água no *boiler* novamente, sendo que, no início do primeiro banho, a quantidade de água era de 500 litros a uma temperatura de 71,0°C. Os quatro banhos foram tomados sem o acionamento do auxiliar elétrico. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.14.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
08	20:00	20:10	500	69,0	00:00
08	20:30	20:40	450	69,0	00:00
08	21:00	21:10	400	69,0	00:00
08	21:30	21:40	350	69,0	00:00
09	20:00	20:10	500	65,8	00:00
09	20:30	20:40	450	65,8	00:00
09	21:00	21:10	400	65,8	00:00
09	21:30	21:40	350	65,8	00:00
10	20:00	20:10	500	71,0	00:00
10	20:30	20:40	450	71,0	00:00
10	21:00	21:10	400	71,0	00:00
10	21:30	21:40	350	71,0	00:00

Tab. 4.14: Sistema com controle *fuzzy*.

4.2.5.4 Comparação entre os Sistemas

Observa-se na Tabela 4.15 que, não houve diferença entre os resultados obtidos com o sistema convencional e com o sistema com controle *fuzzy*, isto devido às ótimas radiações apresentadas durante os dias. Como no caso anterior em nenhuma combinação de banho foi necessário acionar o auxiliar elétrico.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Aux. Ligado - Fuzzy (minutos)	Aux. Ligado - Conv. (minutos)
08	20:00	20:10	00:00	00:00
08	20:30	20:40	00:00	00:00
08	21:00	21:10	00:00	00:00
08	21:30	21:40	00:00	00:00
09	20:00	20:10	00:00	00:00
09	20:30	20:40	00:00	00:00
09	21:00	21:10	00:00	00:00
09	21:30	21:40	00:00	00:00
10	20:00	20:10	00:00	00:00
10	20:30	20:40	00:00	00:00
10	21:00	21:10	00:00	00:00
10	21:30	21:40	00:00	00:00

Tab. 4.15: Comparação entre os sistemas modelados.

4.2.6 Caso # 6

4.2.6.1 Introdução

Neste caso, os dias 17, 18 e 19 de Janeiro de 2008 foram simulados. O grupo apresentou radiações mistas, atingindo seus pontos máximos em 786 W/m^2 , 526 W/m^2 e 450 W/m^2 respectivamente, ilustradas nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27.

Para este grupo a temperatura da água no reservatório de água fria, foi considerada de 27°C variando $\pm 1,5^\circ\text{C}$ durante o dia. Foram tomados quatro banhos diários com duração de 10 minutos cada sempre nos mesmos horários, sendo um pela manhã (5:30 hs), um à tarde (16:00 hs) e dois à noite (21:00 hs e 21:30 hs).

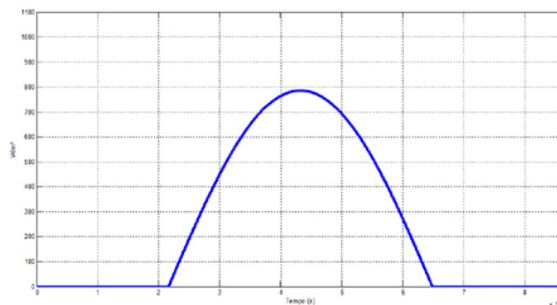
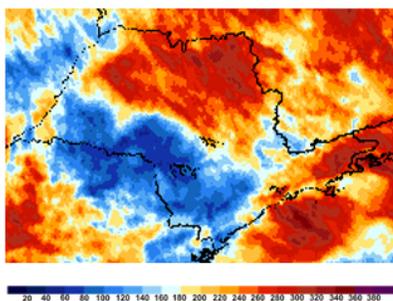


Fig. 4.25: 17 de janeiro de 2008.

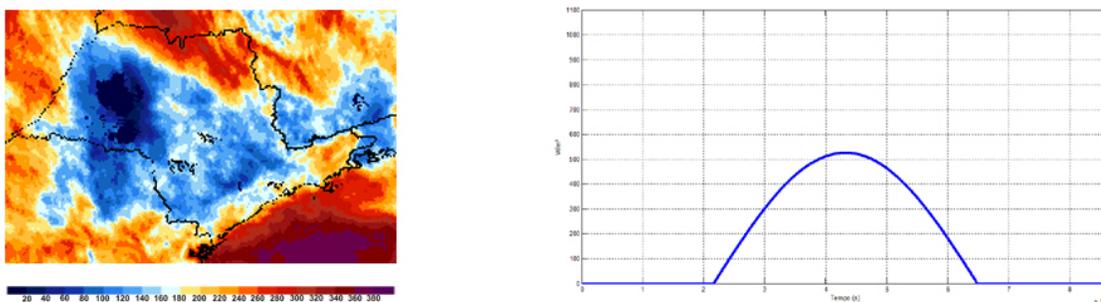


Fig. 4.26: 18 de janeiro de 2008.

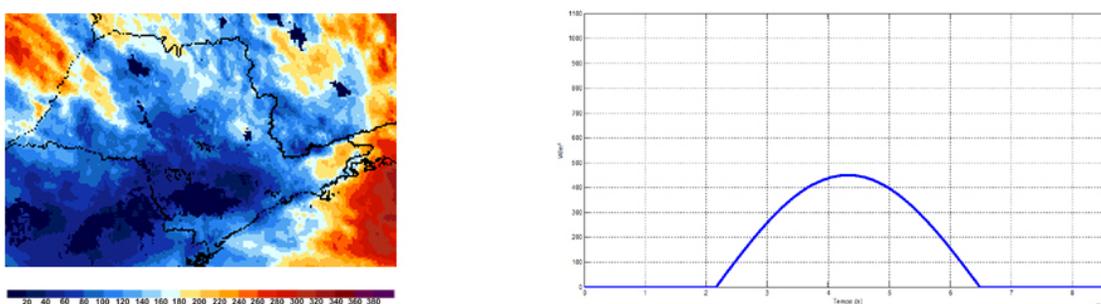


Fig. 4.27: 19 de janeiro de 2008.

4.2.6.2 Análise do Sistema Convencional

A temperatura da água no *boiler* após o ajuste do sistema, era de $53,8^{\circ}\text{C}$ sendo esta a temperatura no início do primeiro dia (17 de janeiro), no qual um banho foi tomado pela manhã. No início do banho da tarde, a temperatura da água era de $61,4^{\circ}\text{C}$, uma vez que a radiação apresentada durante o dia foi boa. À noite, outros dois banhos foram tomados sendo que a temperatura da água no início do primeiro banho era de $58,1^{\circ}\text{C}$.

No início do segundo dia (18 de janeiro) a temperatura da água no *boiler* era de $52,1^{\circ}\text{C}$, outros quatro banhos foram tomados (um pela manhã, um à tarde e dois à noite). Neste caso, a radiação apresentada durante o dia não foi suficiente para aquecer a água, no entanto não foi necessário acionar o auxiliar elétrico, já que a temperatura no *boiler* ainda era superior à mínima desejada.

No início do terceiro dia (19 de janeiro) a temperatura da água era de $44,2^{\circ}\text{C}$. Um banho foi tomado pela manhã, no início do banho da tarde a temperatura da água era de $47,4^{\circ}\text{C}$ e no início do primeiro banho da noite de $45,5^{\circ}\text{C}$, assim o auxiliar elétrico não precisou ser acionado durante os banhos. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.16.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
17	05:30	05:40	500	53,8	00:00
17	16:00	16:10	500	61,4	00:00
17	21:00	21:10	500	58,1	00:00
17	21:30	21:40	500	55,0	00:00
18	05:30	05:40	500	52,1	00:00
18	16:00	16:10	500	50,5	00:00
18	21:00	21:10	500	48,3	00:00
18	21:30	21:40	500	46,2	00:00
19	05:30	05:40	500	44,2	00:00
19	16:00	16:10	500	47,4	00:00
19	21:00	21:10	500	45,5	00:00
19	21:30	21:40	500	43,6	00:00

Tab. 4.16: Sistema convencional.

4.2.6.3 Análise do Sistema com Controle *Fuzzy*

A temperatura da água no *boiler* era de 53,8°C no início do primeiro dia (17 de janeiro), no qual um banho foi tomado pela manhã. Durante o dia houve entrada de água devido a boa radiação apresentada, assim no início do banho da tarde a quantidade de água no *boiler* era de 500 litros e a temperatura era de 61,4°C, temperatura esta que permaneceu nos dois banhos da noite.

No início do segundo dia (18 de janeiro) a temperatura da água no *boiler* permanecia de 61,4°C, sendo que a quantidade era de 350 litros. Mais quatro banhos foram tomados (um pela manhã, um à tarde e dois à noite). Neste dia, a radiação recebida foi menor que a do dia anterior, assim a temperatura no *boiler* permaneceu em 61,4°C.

No início do terceiro dia (19 de janeiro) a temperatura da água ainda era de 61,4°C, já a quantidade de água no *boiler* era de 150 litros. Um banho foi tomado pela manhã, fazendo com que a quantidade atingisse seu mínimo, houve entrada de água e no início do banho da tarde a quantidade era de 200 litros a uma temperatura de 47,4°C, sendo também esta a temperatura nos dois banhos da noite. Os resultados dos gráficos referentes a esta simulação estão sintetizados na Tabela 4.17.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Quant. Água (litros)	Temp. Água (°C)	Aux. Ligado (minutos)
17	05:30	05:40	500	53,8	00:00
17	16:00	16:10	500	61,4	00:00
17	21:00	21:10	450	61,4	00:00
17	21:30	21:40	400	61,4	00:00
18	05:30	05:40	350	61,4	00:00
18	16:00	16:10	300	61,4	00:00
18	21:00	21:10	250	61,4	00:00
18	21:30	21:40	200	61,4	00:00
19	05:30	05:40	150	61,4	00:00
19	16:00	16:10	200	47,4	00:00
19	21:00	21:10	150	47,4	00:00
19	21:30	21:40	100	47,4	00:00

Tab. 4.17: Sistema com controle *fuzzy*.

4.2.6.4 Comparação entre os Sistemas

Nota-se que não houve diferença nos resultados obtidos com o sistema convencional e com o sistema com controle *fuzzy*, uma vez que em nenhum deles foi necessário acionar o auxiliar elétrico como demonstra a Tabela 4.18. Novamente em nenhuma combinação de banho foi necessário acionar o auxiliar elétrico.

Dia	Início (hora)	Término (hora)	Aux. Ligado - Fuzzy (minutos)	Aux. Ligado - Conv. (minutos)
17	05:30	05:40	00:00	00:00
17	16:00	16:10	00:00	00:00
17	21:00	21:10	00:00	00:00
17	21:30	21:40	00:00	00:00
18	05:30	05:40	00:00	00:00
18	16:00	16:10	00:00	00:00
18	21:00	21:10	00:00	00:00
18	21:30	21:40	00:00	00:00
19	05:30	05:40	00:00	00:00
19	16:00	16:10	00:00	00:00
19	21:00	21:10	00:00	00:00
19	21:30	21:40	00:00	00:00

Tab. 4.18: Comparação entre os sistemas modelados.

4.3 Comparação entre os Casos

Analisando os casos apresentados, foi possível perceber que o sistema proposto se mostra muito mais eficiente quando comparado ao convencional principalmente em dias cuja radiação não é alta, como mostra a Tabela 4.19. Para a comparação foi utilizado um auxiliar elétrico de 5,5 *kW* de potência máxima.

Caso	Mês	Auxiliar Ligado (n° de vezes)		Consumo de Energia (<i>kW.h</i>)	
		<i>Fuzzy</i>	Conv.	<i>Fuzzy</i>	Conv.
Caso#1	Junho	03	11	02,75	10,08
Caso#2	Junho	00	06	00,00	05,50
Caso#3	Junho	00	03	00,00	02,75
Caso#4	Janeiro	00	00	00,00	00,00
Caso#5	Janeiro	00	00	00,00	00,00
Caso#6	Janeiro	00	00	00,00	00,00

Tab. 4.19: Comparação entre os casos apresentados.

No caso 1 durante os três dias de simulação no sistema proposto o auxiliar elétrico foi acionado três vezes, ou seja, ficou ligado durante 30 minutos, o que representa um consumo de 2,75 *kW.h*. Já no sistema convencional permaneceu ligado em 11 dos 12 banhos (110 minutos), o que representa um consumo de 10,08 *kW.h*.

No caso 2 durante os três dias de simulação no sistema proposto o auxiliar elétrico não foi acionado. Já no sistema convencional permaneceu ligado em 6 dos 12 banhos (60 minutos), o que representa um consumo de 5,50 *kW.h*. Este caso mostra a superioridade do sistema com controlador *fuzzy* em relação ao sistema convencional, quando analisamos um período maior, supondo por exemplo, que todo o mês apresentasse radiações similares as apresentadas neste caso, a economia gerada seria muito grande.

O caso 3 apresentou radiações boas, durante os três dias de simulação no sistema proposto o auxiliar elétrico não foi acionado. Já no sistema convencional permaneceu ligado em 3 dos 12 banhos (30 minutos), o que representa um consumo de 2,75 *kW.h*.

Nos casos 4, 5 e 6 o auxiliar elétrico permaneceu desligado em ambos os sistemas simulados, uma vez que as radiações apresentadas foram melhores, a temperatura da água no reservatório de água fria é maior e a temperatura mínima da água desejada pelo usuário é menor, visto que tratam-se de casos típicos de verão.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho foi analisado e simulado um novo sistema de controle para aquecimento de água com coletores solares. Foram modelados e simulados dois sistemas de aquecimento solar, um convencional, disponível comercialmente, e outro no qual há uma válvula do tipo Liga/Desliga comandada por um controlador *fuzzy*, que analisa os parâmetros de intensidade de radiação solar, quantidade de água no *boiler* e temperatura da água no *boiler*, permitindo ou não a entrada de água fria.

Ambos os modelos dos sistemas possuem as mesmas características, dentre elas destacamos a maneira simples com que o *boiler* foi modelado, uma vez que, diferentemente dos sistemas físicos não há um gradiente de temperatura, as perdas térmicas não foram consideradas e o equilíbrio térmico é imediato. Entretanto, estas simplificações não alteram os resultados obtidos nas simulações, no que diz respeito à comparação entre a eficiência do sistema convencional e do sistema com controle *fuzzy*.

Para uma análise da eficiência do sistema proposto, diversas simulações foram feitas nos meses de janeiro e junho de 2008, meses escolhidos por apresentarem características distintas. Dentro destes meses, seis grupos com três dias cada foram analisados, sendo que, simulações com 15 combinações de banhos em diferentes horários foram realizadas.

Ao final, notou-se que, em dias cuja radiação solar apresentada não é alta, que são os dias críticos para os sistemas de aquecimento solar, o sistema aqui proposto se mostra muito mais eficiente quando comparado ao sistema convencional. No mês de junho, por exemplo, em um determinado caso com o sistema convencional, o aquecedor auxiliar elétrico permaneceu ligado durante os três dias da simulação, por 91,7% do tempo quando foi usada a água quente, enquanto que no sistema com controle *fuzzy* foi ligado em apenas 30% do tempo. Como, além disso, a diferença de temperatura na água a ser aquecida é diferente nos dois sistemas, a energia dissipada no sistema convencional foi de 10,08 *kW.h* enquanto que no sistema proposto a energia elétrica consumida foi de 2,75 *kW.h* e de apenas 1,86 *kW.h* quando utilizado no sistema um controle de temperatura.

A economia de energia observada em apenas três dias de operação em um consumidor residencial quando extrapolada para um consumidor de grande porte pode se tornar um fator de enorme importância econômica.

O sistema proposto é muito mais eficiente do que os disponíveis comercialmente, sendo uma melhoria fundamental e com grande possibilidade de ser aplicada no mercado de aquecimento solar. As dificuldades para a implementação de um sistema como este não são grandes, o custo do sistema também não é alto e espera-se que os fabricantes em breve possam implementar soluções deste tipo para aumentarem a eficiência de seus sistemas de aquecimento.

Por outro lado, este sistema proposto ainda pode ser melhorado. Como continuação deste trabalho propõe-se:

- Fazer um modelo mais preciso do *boiler*, considerando o gradiente de temperatura, o equilíbrio térmico não instantâneo e as perdas térmicas ocorridas geralmente à noite;
- Criar uma rede neural que será responsável por aprender os hábitos de uma determinada família, de maneira que permita a entrada de água em outras ocasiões além das já permitidas pelas regras *fuzzy*, otimizando ainda mais o sistema e evitando que a temperatura do *boiler* fique abaixo da mínima desejada durante os banhos;
- Realizar a implementação física do sistema e instalar no campo, mesmo que sem o controlador *fuzzy* numa primeira etapa, mas com um *data-logger* ligado a ele, para se ter maior quantidade de dados e conhecer melhor as aplicações reais destes sistemas de aquecimento solar. Este trabalho já está em andamento, sendo tema de outra dissertação de mestrado.

Apêndice A

Fundamentos da Teoria *Fuzzy*

A.1 Introdução

O marco inicial da história da lógica *fuzzy* está relacionado à publicação do artigo “*Fuzzy Sets*” por Zadeh [25], no qual a teoria dos conjuntos *fuzzy* foi introduzida com o objetivo de tratar o aspecto vago da informação.

Desde então, o assunto tem sido foco de inúmeras pesquisas, das quais diversas aplicações surgiram nas mais diferentes áreas. O Japão é um dos principais desenvolvedores de sistemas baseados em lógica *fuzzy*, já que inicialmente o ocidente apresentou uma certa resistência a essa nova teoria.

A.2 Conjuntos *Fuzzy*

Os conjuntos *fuzzy* permitem a pertinência parcial de um elemento no conjunto. Um conjunto *fuzzy* A em um universo de discurso U pode ser representado como um conjunto de pares ordenados de um elemento x e seu grau de pertinência $\mu_A(x)$ da forma [26]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (\text{A.1})$$

sendo que, o universo de discurso é um conjunto no qual todos os objetos possuem as mesmas características, podendo este ser contínuo ou discreto. Assim, se o universo U for discreto e finito, ele é representado pela seguinte notação :

$$A = \sum_i \mu_A(x_i)/x_i \quad (\text{A.2})$$

Caso seja contínuo e infinito é denotado por :

$$A = \int \mu_A(x)/x \quad (\text{A.3})$$

É importante ressaltar que os símbolos \sum , \int e $/$ não denotam os operadores de soma, integração e divisão, tendo aqui somente um significado simbólico [27].

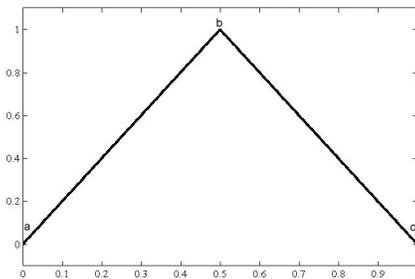
A.2.1 Função de Pertinência

A função de pertinência mostra o grau de pertinência de um elemento em relação a um determinado conjunto. Assim, um conjunto *fuzzy* definido pela função de pertinência $\mu_A(x)$ estabelece para cada x um grau de pertinência no conjunto *fuzzy* A , que pode assumir qualquer valor no intervalo $[0, 1]$, assim temos que:

- $\mu_A(x) = 1$, se x pertence totalmente ao conjunto A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$, se x pertence parcialmente ao conjunto A ;
- $\mu_A(x) = 0$, se x não pertence ao conjunto A .

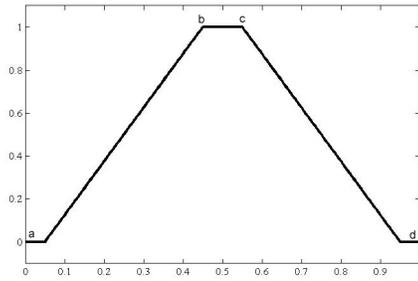
As formas e os parâmetros das funções de pertinência mais adequados para caracterizar um certo conjunto *fuzzy* dependem do contexto da aplicação. Em sistemas cujos parâmetros são definidos subjetivamente, a escolha de funções triangulares e trapezoidais é mais comum, devido a idéia de definirem regiões de pertinência total, média e nula.

Estas funções também fornecerem um bom desempenho a um baixo custo computacional, além de serem mais intuitivas, uma vez que os conceitos ligados às funções gaussianas são o do valor modal e da dispersão. As funções gaussianas, são bastante utilizadas em sistemas adaptativos, nos quais os parâmetros são ajustados afim de otimizar o objetivo definido a partir dos dados de entrada-saída [28]. As funções de pertinência citadas estão ilustradas nas Figuras A.1, A.2 e A.3.



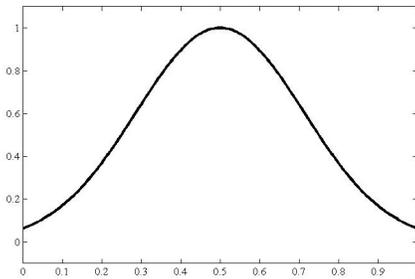
$$f(x; a, b, c) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{array} \right\}$$

Fig. A.1: Triangular



$$f(x; a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{array} \right\}$$

Fig. A.2: Trapezoidal



$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$$

Fig. A.3: Gaussiana

A.2.2 Conceitos Básicos de Conjuntos *Fuzzy*

Como toda a informação contida em um conjunto *fuzzy* é descrita por meio de uma função de pertinência, é importante expor os termos que descrevem as características especiais desta função [29].

- **Núcleo:** O núcleo de um conjunto *fuzzy* A compreende todos os elementos com valor de pertinência igual a um.

$$Nu(A) = \{x \in U | \mu_A(x) = 1\} \tag{A.4}$$

- **Suporte:** O suporte de um conjunto *fuzzy* A compreende todos os elementos com pertinência maior que zero.

$$Su(A) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \tag{A.5}$$

- **Altura:** A altura de um conjunto *fuzzy* A é o valor máximo da função de pertinência.

$$Al(A) = \max_{x \in U} \{\mu_A(x)\} \tag{A.6}$$

- (α – corte) : O conjunto A_α é um conjunto *crisp* chamado de conjunto α – corte do conjunto *fuzzy* A . Um elemento $x \in A_\alpha$ pertence a A com um grau de pertinência que é maior ou igual ao valor de α [30].

$$A_\alpha = \{x | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (\text{A.7})$$

- **Conjunto *Fuzzy Normal*:** Um conjunto *fuzzy* A é dito normal se possuir pelo menos um elemento com pertinência igual a um. Caso contrário, é chamado de subnormal.

$$\mu_A(x) = 1, \quad x \in U \quad (\text{A.8})$$

- **Conjunto *Fuzzy Convexo*:** Um conjunto *fuzzy* é convexo se sua função de pertinência é tal que [31]:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)] \quad (\text{A.9})$$

para todo:

$$x_1, x_2 \in U, \lambda \in [0, 1] \quad (\text{A.10})$$

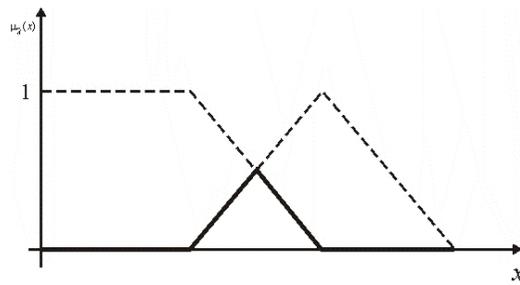
Para que um conjunto *fuzzy* possa ser considerado um número *fuzzy*, três propriedades básicas devem ser obedecidas. O conjunto *fuzzy* deve ser normal, convexo e seu suporte deve ser limitado [30].

A.2.3 Operações com Conjuntos *Fuzzy*

Dados os conjuntos *fuzzy* A e B no universo U . Para um dado elemento x do universo, as seguintes operações são definidas [30]:

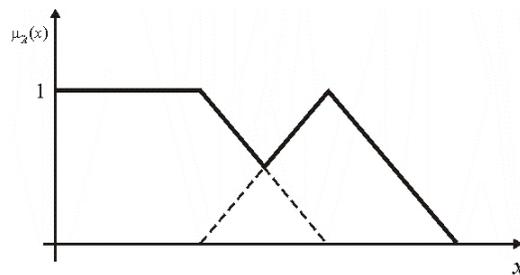
- **Interseção:**

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (\text{A.11})$$

Fig. A.4: Interseção dos conjuntos A e B .

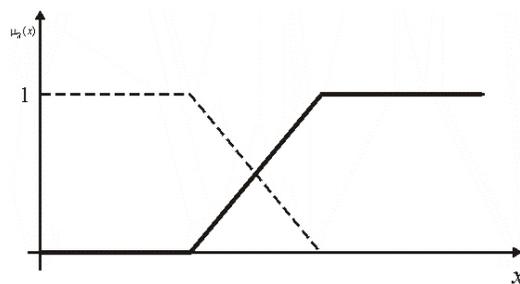
- **União:**

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (\text{A.12})$$

Fig. A.5: União dos conjuntos A e B .

- **Complemento:**

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{A.13})$$

Fig. A.6: Complemento do conjunto A .

Os conjuntos *fuzzy* seguem algumas propriedades convencionais, tais como: comutatividade, associatividade, distributividade, idempotência, identidade, transitividade, entre outras. Suportam as leis De Morgan, mas não suportam a lei da contradição e do meio exclusivo.

- Comutatividade:

$$\begin{aligned} A \cup B &= B \cup A \\ A \cap B &= B \cap A \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

- Associatividade:

$$\begin{aligned} A \cup (B \cup C) &= (A \cup B) \cup C \\ A \cap (B \cap C) &= (A \cap B) \cap C \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

- Distributividade:

$$\begin{aligned} A \cup (B \cap C) &= (A \cup B) \cap (A \cup C) \\ A \cap (B \cup C) &= (A \cap B) \cup (A \cap C) \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

- Idempotência:

$$A \cup A = A \quad A \cap A = A \quad (\text{A.17})$$

- Identidade:

$$\begin{aligned} A \cup \emptyset &= A \quad e \quad A \cap X = A \\ A \cap \emptyset &= \emptyset \quad e \quad A \cup X = X \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

- Transitividade:

$$\text{Se } A \subseteq B \subseteq C, \text{ então } A \subseteq C \quad (\text{A.19})$$

- Leis De Morgan:

$$\begin{aligned} \overline{A \cap B} &= \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} &= \overline{A} \cap \overline{B} \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

- Lei da Contradição:

$$A \cap \overline{A} = \emptyset \quad (\text{A.21})$$

- Lei do Meio Exclusivo:

$$A \cup \overline{A} = X \quad (\text{A.22})$$

A.2.4 Normas e Co-normas Triangulares

As normas e co-normas triangulares formam uma classe geral de operadores de união e interseção e seguem as propriedades de comutatividade, associatividade, monotonicidade e das condições de contorno [32]. Diferente da união e interseção, que trabalham com conjuntos definidos em um mesmo universo, as operações baseadas em normas e co-normas podem operar conjuntos em universos distintos.

Assim, sejam A e B dois conjuntos *fuzzy* definidos nos universos X e Y , respectivamente, e a e b valores de pertinência dados por $a = \mu_A(x)$ e $b = \mu_B(y)$, as normas e co-normas podem ser definidas como:

- **Norma-t:** Uma norma triangular (norma-t) é uma operação binária $\mathbf{t} : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ que satisfaz as seguintes condições:

- Comutatividade: $a \mathbf{t} b = b \mathbf{t} a$;
- Associatividade: $a \mathbf{t} (b \mathbf{t} c) = (a \mathbf{t} b) \mathbf{t} c$;
- Monotonicidade: Se $a \leq b$ e $c \leq d$ então $a \mathbf{t} c \leq b \mathbf{t} d$;
- Condições de Contorno: $0 \mathbf{t} a = 0$, $1 \mathbf{t} a = a$.

Dentre as normas-t mais utilizadas estão:

- Interseção: $a \mathbf{t} b = \min(a, b)$;
- Produto algébrico: $a \mathbf{t} b = ab$;
- Produto limite: $a \mathbf{t} b = \max\{0, a + b - 1\}$;
- Produto drástico: $a \mathbf{t} b = \begin{cases} a & b = 1 \\ b & a = 1 \\ 0 & a, b < 1 \end{cases}$

- **Norma-s:** Uma co-norma (norma-s) é uma operação binária $\mathbf{s} : [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ e satisfaz as seguintes condições:

- Comutatividade: $a \mathbf{s} b = b \mathbf{s} a$;
- Associatividade: $a \mathbf{s} (b \mathbf{s} c) = (a \mathbf{s} b) \mathbf{s} c$;
- Monotonicidade: Se $a \leq b$ e $c \leq d$ então $a \mathbf{s} c \leq b \mathbf{s} d$;
- Condições de Contorno: $0 \mathbf{s} a = a$, $1 \mathbf{s} a = 1$;

Dentre as mais utilizadas estão:

- União: $a \mathbf{s} b = \max(a, b)$;
- Soma algébrica: $a \mathbf{s} b = a + b - ab$;
- Soma limite: $a \mathbf{s} b = \min\{1, a + b\}$;
- Soma drástica: $a \mathbf{s} b = \begin{cases} a & b = 0 \\ b & a = 0 \\ 0 & a, b > 0 \end{cases}$

A.2.5 Relações *Fuzzy*

Sendo as relações *fuzzy* generalizações das relações tradicionais, elas mapeiam elementos de um universo para outro através do produto cartesiano dos universos. O grau da relação é definido no intervalo unitário $[0, 1]$. Essas relações seguem as propriedades de comutatividade, associatividade, distributividade, idempotência, entre outras, e assim como os conjuntos *fuzzy*, suportam as leis De Morgan, mas não a lei da contradição e do meio exclusivo [30].

A.2.5.1 Operações com Relações Fuzzy

Sendo R e S relações fuzzy no espaço cartesiano $X \times Y$, as seguintes operações podem ser aplicadas:

- **Interseção**

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) \mathbf{t} \mu_S(x, y) \quad (\text{A.23})$$

- **União**

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \mathbf{s} \mu_S(x, y) \quad (\text{A.24})$$

- **Complemento**

$$\mu_{\bar{R}}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y) \quad (\text{A.25})$$

A.2.5.2 Composição Fuzzy

Supondo que R , S e T são relações fuzzy no espaço cartesiano $X \times Y$, $Y \times Z$ e $X \times Z$ respectivamente, tais relações podem ser combinadas utilizando diferentes operadores de composição, dentre os mais comuns podemos citar [30]:

- **Composição** $T = R \circ S$

$$\mu_T(x, z) = \max_{y \in Y} [\mu_R(x, y) \mathbf{t} \mu_S(y, z)] \quad (\text{A.26})$$

Sendo que, as composições mais conhecidas são: *max - min* e a *max - prod*.

- **Composição** $T = R \bullet S$

$$\mu_T(x, z) = \min_{y \in Y} [\mu_R(x, y) \mathbf{s} \mu_S(y, z)] \quad (\text{A.27})$$

Na qual *min - max* é a composição mais comum.

A.3 Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy tem como objetivo modelar de modo aproximado o raciocínio, tentando imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e imprecisão.

A.3.1 Variável Linguística

Zadeh [33] propôs o conceito de variáveis linguísticas, no qual a informação é processada através de conjuntos fuzzy como uma alternativa para modelar o pensamento humano. Assim, temos que uma variável linguística é uma variável cujos valores são representados por palavras ao invés de números e tal variável pode ser caracterizada por uma quintupla $(x, T(x), U, G, M)$ [34], sendo que:

- x : é o nome da variável;

- $T(x)$: é o conjunto dos termos linguísticos de x ;
- U : universo de discurso;
- G : é uma regra sintática que gera os termos linguísticos de x ;
- M : é uma regra semântica que associa a cada termo linguístico o seu significado.

Em geral, uma variável linguística está associada a um conjunto de termos e, através da partição *fuzzy*, que pode ser uniforme (todos os termos são iguais e equidistantes) ou não-uniforme, o número de termos que define a granularidade das partições de cada universo é determinado. Um número pequeno define uma partição grossa, ao passo que um número maior define uma partição fina.

Na maioria das vezes a partição *fuzzy* é obtida manualmente, através da intervenção de um especialista. No entanto, existem abordagens automáticas que definem através dos dados de entrada-saída a melhor partição da aplicação em questão.

A.3.1.1 Restrições Linguísticas

A lógica *fuzzy* permite o uso de quantificadores *fuzzy*, predicados *fuzzy* e uma variedade de modificadores. Tais modificadores atuam nas funções de pertinência, modificando seu formato. Dentre os mais comuns podemos citar: concentração, que diminui os valores da função de pertinência; dilatação, que aumenta os valores da função de pertinência e intensificação, que combina concentração e dilatação, dilatando o conjunto para valores de pertinência acima de 0,5 e concentrando o conjunto para valores abaixo de 0,5 [35].

A.3.2 Regras *Fuzzy*

Os sistemas baseados em regras *fuzzy*, são muito apropriados quando se deseja uma representação linguística do conhecimento adquirido e se apresentam como uma ferramenta importante para a modelagem de sistemas complexos. Em geral, as regras *fuzzy* também conhecidas como declarações condicionais *fuzzy* ou implicações *fuzzy*, assumem a forma:

Se <antecedente> **então** <consequente>

Na qual, os antecedentes e os consequentes podem ser representados por proposições do tipo (x é A) e (y é B), resultando em regras na forma:

Se x é A **então** y é B

sendo, x e y variáveis linguísticas e A e B termos linguísticos definidos por conjuntos *fuzzy* nos universos X e Y respectivamente. Caso haja mais que uma proposição, estas serão relacionadas pelos conectivos (**E**) ou (**OU**).

Regras deste tipo, podem ser representadas pela implicação *fuzzy* $A \rightarrow B$ e definidas como uma relação *fuzzy* R no espaço do produto cartesiano $X \times Y$. A seguir mostra-se alguns dos operadores de implicação mais utilizados [30]:

- Zadeh:

$$\mu_R(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (\text{A.28})$$

- Mamdani:

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (\text{A.29})$$

- Larsen:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (\text{A.30})$$

- Lukasiewicz:

$$\mu_R(x, y) = \min\{1, [1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]\} \quad (\text{A.31})$$

A.3.3 Raciocínio Aproximado

Todo método de raciocínio pode ser definido como um processo de inferência que produz conclusões a partir de um conjunto formado por uma ou mais regras e fatos conhecidos. O raciocínio aproximado [36] envolve a computação com regras imprecisas e utiliza o *modus ponens* generalizado no mecanismo de inferência.

- *modus ponens* generalizado:

- **fato:** x é A'
- **regra:** Se x é A então y é B
- **conclusão:** y é B'

Nota-se que é possível através da regra **Se** x é A **então** y é B , dado um novo antecedente x é A' , encontrar um novo consequente y é B' . Para isso, utiliza-se a regra composicional de inferência [30].

$$B' = A' \circ R \quad (\text{A.32})$$

A.4 Controlares *Fuzzy*

Um sistema de controle em si é uma construção matemática que tem como objetivo principal a substituição do ser humano na realização das atividades de controle e, portanto, no processo de tomada de decisão. A modelagem de sistemas de controle com base em ferramentas matemáticas tradicionais, no entanto, não é adequada para o tratamento de sistemas que possuem informações imprecisas ou incertas.

Diante deste problema, os controladores *fuzzy* merecem destaque, já que utilizam-se de regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever em uma rotina a experiência acumulada, a intuição e a heurística para controlar um determinado processo [25]. Além disso, são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar. Também são versáteis, principalmente quando o modelo físico é complexo e de difícil representação matemática.

Nesses controladores, os conjuntos de regras expressam de forma qualitativa a experiência dos operadores especialistas e também o conhecimento das estratégias de controle.

Segundo Lee [34], a estrutura básica de um controlador lógico *fuzzy* possui quatro componentes principais, conforme ilustrado na Figura A.7.

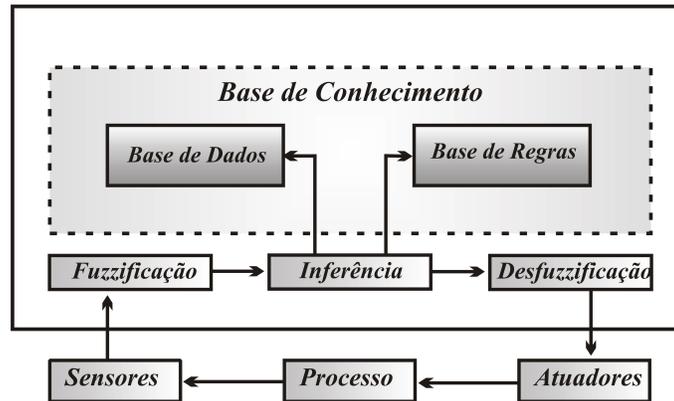


Fig. A.7: Estrutura de um controlador *fuzzy*.

- **Interface de *Fuzzificação***

- Mede os valores das variáveis de entrada;
- Produz uma sequência de mapeamentos que transfere o universo dos valores das variáveis de entrada em universos de discurso correspondentes;
- Executa a função de *fuzzificação*, convertendo os dados de entrada dentro de termos linguísticos apropriados, que podem ser vistos como rótulos dos conjuntos *fuzzy*.

- **Base de Conhecimento**

A base de conhecimento abrange um conhecimento do domínio da aplicação e desempenha metas de controle. Além de constituir-se de uma base de dados e de uma base de regras.

- Base de dados: a base de dados fornece as definições necessárias para definir as regras linguísticas de controle.
- Base de regras: a base de regras caracteriza as metas de controle por meio de um conjunto de regras linguísticas.

- **Inferência**

Inferência é a essência de um controlador lógico *fuzzy*. Tem a capacidade de simular os processos de decisão humana baseados em conceitos *fuzzy* e de inferir ações de controle *fuzzy*, empregando implicações *fuzzy* e regras de inferência da lógica *fuzzy*.

- **Interface de *Desfuzzificação***

- Uma sequência de mapeamentos que converte o universo de valores das variáveis de saída em universos de discurso correspondentes;
- Produz uma ação de controle não-*fuzzy* a partir de uma ação de controle *fuzzy* inferida.

Dentre os métodos de *desfuzzificação* mais utilizados podemos destacar:

- Método do Centro da Área (COA);
- Método da Média dos Máximos (MOM);
- Primeiro Máximo (SOM).

A.5 Modelos de Sistemas *Fuzzy*

Existem diversos modelos de sistemas *fuzzy*, e na maioria dos casos a distinção se dá no consequente das regras. Dentre os modelos mais conhecidos podemos destacar o Modelo Mamdani e o Modelo Sugeno, os quais foram incorporados à ferramenta MatLab [16].

A.5.1 Modelo Mamdani

Proposto por Mamdani [37], este método de inferência utiliza conjuntos *fuzzy* nos antecedentes e nos consequentes. Sendo que, as regras utilizando este modelo podem ter a seguinte forma:

Se x é A e y é B então z é C

Sendo, A e B conjuntos *fuzzy* no antecedente, C um conjunto *fuzzy* no consequente, x e y variáveis linguística de entrada e z uma variável linguística de saída.

Neste modelo, o primeiro passo é determinar o grau com que as entradas pertencem a cada conjunto *fuzzy* via função de pertinência. Em seguida aplica-se o método de implicação cuja função é combinar os antecedentes, resultando em conjuntos *fuzzy* que representam a saída de cada regra. Tais conjuntos são combinados em um único conjunto *fuzzy* pelo método da agregação.

Por fim, para se obter uma saída final não *fuzzy*, adota-se um dos métodos de *desfuzzificação* citados anteriormente A.4.

A Figura A.8 ilustra um sistema de inferência do tipo Mamdani, possibilitando a visualização de cada etapa do processo de inferência citado.

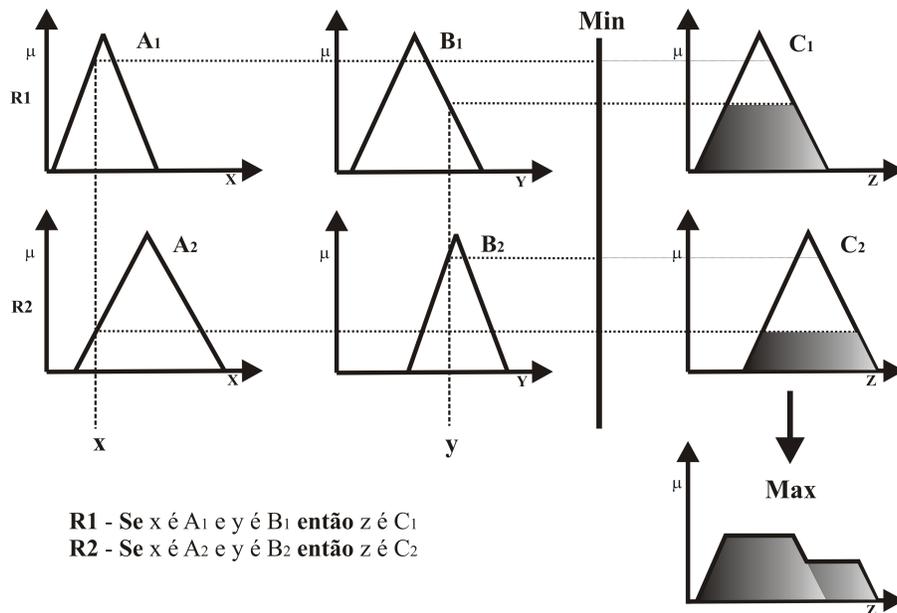


Fig. A.8: Sistema Mamdani.

A.5.2 Modelo Sugeno

Proposto por Sugeno [22] esse método é similar ao método Mamdani em muitos aspectos, sendo que a principal diferença está na saída, na qual o consequente não é um conjunto *fuzzy* mas sim uma função das variáveis de entrada.

Os modelos mais comuns são os de primeira - ordem (consequentes lineares), no qual, A e B são conjuntos *fuzzy* no antecedente enquanto p , q e r são todos constantes:

$$\text{Se } x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B \text{ então } z = p * x + q * y + r$$

e os de ordem - zero (consequentes constantes), no qual A e B são conjuntos *fuzzy* no antecedente e k é um *crisp* definido constante no consequente:

$$\text{Se } x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B \text{ então } z = k$$

Neste modelo, a *fuzzificação* das entradas e a aplicação do operador *fuzzy* são exatamente iguais as realizadas no método Mamdani A.5.1, no entanto a saída final é obtida através da média ou soma ponderada das saídas de cada regra, usando-se o grau de ativação destas regras como ponderação. A Figura A.9 mostra um sistema de inferência Sugeno de primeira - ordem.

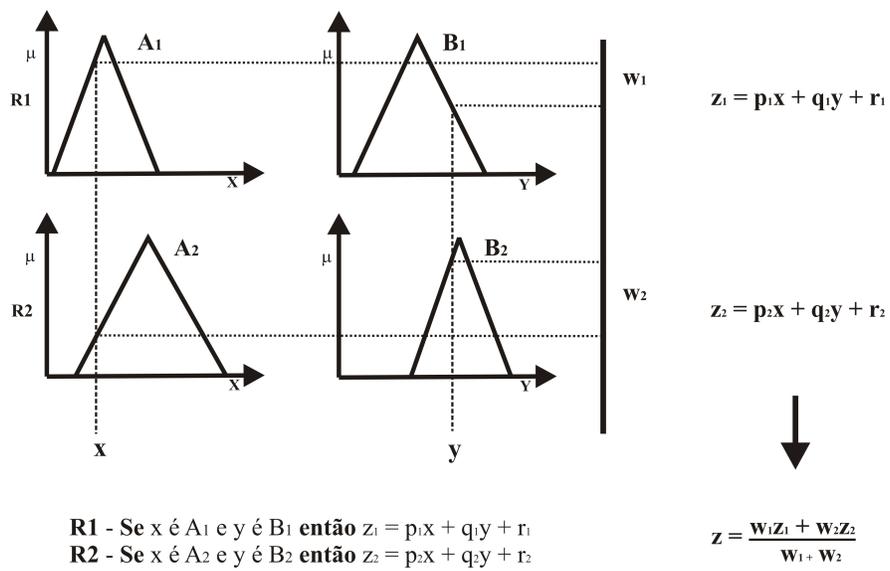


Fig. A.9: Sistema Sugeno.

Referências Bibliográficas

- [1] A. W. A. Souza. *Fundamentos da teoria da energia solar e de seu uso*. Ed. da Fundação Brasileira de Direito Econômico, 1994.
- [2] CRESESB. Tutorial de energia solar - princípios e aplicações. <http://www.cresesb.cepel.br> - Acesso: Mai2007, 2007.
- [3] Geni. Solar energy. <http://www.geni.org> - Acesso: Jun2008, 2008.
- [4] C. Tiba. *Atlas solarimétrico do Brasil - Banco de dados terrestre*. Ed. Universitária da UFPE, 2000.
- [5] CPFL. Cpfll - praticas de utilização consciente da energia elétrica. <http://www.cpfll.com.br> - Acesso: Set2008, 2008.
- [6] Cidades Solares. Cidades solares - aquecedor solar reduz consumo de energia e água e preserva o meio ambiente. <http://www.cidadessolares.org.br> - Acesso: Ago2008, 2008.
- [7] R. Matajs and S. P. Lima. Tecnologia termosolar alternativa para a redução dos impactos socioambientais da energia elétrica. <http://www.eca.usp.br> - Acesso: Abr2008, 2005.
- [8] R. Rostand. Energia solar - formas de aproveitamento. <http://www.aondevamos.eng.br> - Acesso: Mai2007, 2007.
- [9] Soletrol. Perguntas e respostas mais frequentes. <http://www.soletrol.com.br> - Acesso: Mai2007, 2007.
- [10] Heliotek. Reservatório térmico. <http://www.heliotek.com.br> - Acesso: Mai2007, 2007.
- [11] Astrosol. Astrosol - energia solar. <http://www.astrosol.com.br> - Acesso: Abr2008, 2008.
- [12] Solares. Coletor solar. <http://www.solares-online.com.br> - Acesso: Set2007, 2007.
- [13] A. M. Bezerra. *Energia solar*. 1981.
- [14] J.T. Fantinelli. *Análise da evolução de ações na difusão do aquecimento solar de água para habitações populares estudo de caso em Contagem - MG*. Tese de doutorado, FEM - UNICAMP, Fevereiro 2006.
- [15] Estec. Estec - perguntas frequentes técnicas. <http://www.estec.com.pt> - Acesso: Mai2007, 2007.

- [16] MathWorks. *Fuzzy Logic Toolbox*, 2006.
- [17] J. R. Tyldesley. *An introduction to applied thermodynamics and energy conversion*. Longman, 1977.
- [18] S.J. Harrison, Q. Lin, and L.C.S. Mesquita. Integral stagnation temperature control for solar collectors. *SESCI 2004 Conference - University of Waterloo, Canada*, 2004.
- [19] P. Intawee, C. Chaichoet, and J. Laksanaboonsong. Efficiency enhancement of solar water heater. <http://e-nett.sut.ac.th>, 2007.
- [20] R. C. Dorf and R. H. Bishop. *Modern control systems*. Addison-Wesley, 1995.
- [21] K. Ogata. *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall, 2003.
- [22] M. Sugeno. *Industrial applications of fuzzy control*. Elsevier Science, 1985.
- [23] INPE. Acesso ao banco de dados - históricos de radiação solar. <http://satelite.cptec.inpe.br> - Acesso: Set2008, 2008.
- [24] CEPAGRI. Clima dos municípios paulistas. <http://www.cpa.unicamp.br> - Acesso: Set2008, 2008.
- [25] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.
- [26] D. Dubois and H. Prade. *Fuzzy sets and systems - Theory and applications*. Academic Press, Inc., 1980.
- [27] H. Bandemer and S. Gottwald. *Fuzzy sets, fuzzy logic, fuzzy methods with applications*. Wiley, 1995.
- [28] J. S. R. Jang, C. T. Sun, and E. Mizutani. *Neuro-fuzzy and soft computing*. Prentice Hall, 1997.
- [29] M. Hanss. *Applied fuzzy arithmetic*. Springer, 2005.
- [30] T. J. Ross. *Fuzzy logic with engineering applications*. McGraw-Hill, 1995.
- [31] I. S. Shaw. *Fuzzy control of industrial systems*. Kluwer Academic, 1998.
- [32] W. Pedrycs and F. Gomide. *An introduction to fuzzy sets: Analysis and design*. MIT Press, Cambridge, 1998.
- [33] L. A. Zadeh. Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 3:28–44, 1973.
- [34] C. C. Lee. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller - part i and part ii. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20:404–435, 1990.
- [35] L. A. Zadeh. A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges. *J. Cybern*, 2:4–34, 1972.

- [36] L. A. Zadeh. *A theory of approximate reasoning*. Halstead Press, 1979.
- [37] E. H. Mamdani and S. Assilian. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7:1–13, 1975.